

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

DIÓGENES VIRGÍNIO DO NASCIMENTO

**FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A UMIDADE EM
SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO**

RECIFE

2015

DIÓGENES VIRGÍNIO DO NASCIMENTO

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A UMIDADE EM
SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal Rural de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof^a Dra. Ceres Duarte Guedes
Cabral de Almeida

RECIFE

2015

Ficha catalográfica

N244f Nascimento, Diógenes Virgínio do
Funções de pedotransferência para estimar a umidade em
solos cultivados com cana-de-açúcar na zona da mata de
Pernambuco / Diógenes Virgínio do Nascimento. – Recife,
2015.
76 f. : il.

Orientador: Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Engenharia Agrícola, Recife, 2015.

Inclui referência(s) e apêndice(s).

1. Capacidade preditiva 2. Potencial mátrico 3. Stepwise
4. Pedofunções 5. Propriedades físico-hídricas do solo
I. Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de, orientador II. Título

CDD 631

DIÓGENES VIRGÍNIO DO NASCIMENTO

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A UMIDADE EM
SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE
PERNAMBUCO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal Rural de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em 28 de julho de 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Orientadora

Prof. Dr. João Audifax César de Albuquerque Filho
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. André Júlio do Amaral
EMBRAPA UEP-Recife

Dedico

Aos meus pais Ivoneide Virginio e Hermógenes Ferreira, por acreditarem em mim.

Ao meu tio Ionésio Virginio (*in memoriam*) na qual me ensinou o que é viver realmente, e me concedeu grande parte da minha formação moral, muitas batalhas nós traçamos e vencemos e aprendi muito ao seu lado e sempre terei você como referência na minha vida, e sempre levarei comigo nossas conversas e seus conselhos, e tenho a esperança em Deus que será como ficou escrito “Meu amanhã um dia o sol não brilhará, e quando isso acontecer, ao abrir meus olhos nós vamos nos encontrar” (Ionésio Virginio).

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, em primeiro lugar, a capacitação concedida, que sempre está comigo me dando força, saúde e sabedoria.

À minha orientadora Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida, pela orientação, dedicação, amizade e ensinamentos pessoais e profissionais que contribuíram na realização deste trabalho.

Ao professor Joao Audifax César de Albuquerque Filho, pela ajuda nas análises dos dados e sua importante contribuição na geração das Funções de Pedotransferência.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade em realização do curso de Mestrado.

Ao professor Dr. Ênio Farias de França e Silva pelas ideias no trabalho.

Ao professor Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pela orientação na realização das análises de física do solo.

Ao professor Dr. Mário Monteiro Rolim, por ter concedido o laboratório de mecânica do solo para realização das análises.

Ao professor Dr. Egidio Bezerra Neto, por ser prestativo e pela atenção dada nas análises de carbono orgânico no laboratório de bioquímica.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao gerente agrícola Gledson da Usina Santa Teresa pelo apoio, confiança assistência recebida para realizar as coletas na propriedade da empresa.

Agradeço aos funcionários da Usina, especialmente à Sidiclei pela ajuda nas coletas de solos. Ao amigo Ernandes Medeiros que demonstrou uma grande ajuda nas coletas de solo.

Aos colegas Edvanilson Luiz e Ayrton Silva pelo auxílio nas análises.

Aos colegas Gerônimo Ferreira e Uilka Elisa, pelo auxílio nos laboratórios.

A todos os professores do curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas de mestrado, pela amizade e companheirismo ao longo destes anos.

Agradeço também a todas as pessoas que me ajudaram e me apoiaram de alguma forma na execução desta dissertação. Em especial, Dayane Monalise, por ser companheira, atenciosa, forte, e por todo conselho e ajuda oferecida.

Aos meus pais por terem me possibilitado conquistar este sonho; que durante o tempo dispensado para este trabalho souberam compreender os momentos onde foram preteridos da minha companhia para elaboração deste trabalho.

A todos que colaboram de forma direta e indireta para realização desta dissertação.

*“Esvazie sua mente, não tenha forma, seja moldável, como a água.
Se você coloca água em uma xícara, ela se torna a xícara.
Você coloca água em uma garrafa, ela se torna a garrafa.
Você coloca-a em um bule, ela se torna o bule.
Agora, a água pode fluir ou pode destruir.
Seja água meu amigo” (Bruce Lee)*

Sumário

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	12
1 INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1 HIPÓTESE	16
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR: CICLO FENOLÓGICO E ASPECTOS ECONÔMICOS.....	17
2.2 INFLUÊNCIA NA RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PELAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E CARBONO ORGÂNICO	20
2.3 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO SOLO PARA CANA-DE-AÇÚCAR.....	22
2.4 MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA CANA-DE-AÇÚCAR	24
2.5 ATRIBUTOS UTILIZADOS PARA SE DESENVOLVER FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	27
2.5.1 Análise Granulométrica	27
2.5.2 Densidade do solo	28
2.5.3 Carbono Orgânico no solo	29
2.5.4 Umidade do solo	30
2.6 HISTÓRICO DAS FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA HIDROLOGIA DO SOLO.....	31
2.6.1 Funções de Pedotransferência	33
2.6.2 Tipos de Funções de Pedotransferência	36
2.6.3 Métodos para estimar a retenção de água no solo utilizando Funções de Pedotransferência	38
2.6.4 Regressões lineares múltiplas	38
2.6.5 Desempenho das Funções de Pedotransferência	39
3 MATERIAL E MÉTODOS	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5 CONCLUSÕES	61
6 REFERÊNCIAS CITADAS	62
APÊNDICE A - TABELAS	69
APÊNDICE B - FIGURAS	73

NASCIMENTO, Diógenes Virgínio. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMAR A UMIDADE EM SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO. Dissertação. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE, 2015.

RESUMO

Esta dissertação é referente aos conhecimentos sobre Funções de Pedotransferência (FPT), possibilitando um entendimento relacionado ao conteúdo de água no solo a partir das influências nas propriedades do solo e nas análises estabelecidas para gerar as FPTs. O objetivo deste trabalho foi gerar funções de pedotransferência com base em atributos físico-hídricos do solo e a relação do carbono orgânico para estimar a umidade do solo. O trabalho foi realizado na área pertencente à Usina Santa Teresa localizada no município de Goiana, PE (7°36'56"S 34°59'19"W), em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) irrigada por sistema Lateral Móvel Linear. As variáveis adotadas como dependentes foram umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e as variáveis independentes foram areia, silte, argila, densidade do solo e carbono orgânico. As funções de pedotransferência foram geradas a partir do método de regressão linear múltipla aplicando a técnica de stepwise backward elimination para seleção das variáveis candidatas ao modelo. Assim, as FPT geradas estimam o conteúdo de água no solo equilibrada nos potenciais mátricos equivalentes à umidade na capacidade de campo de -10kPa para solos arenosos, -33kPa para solos argilosos e ao ponto de murcha permanente de -1500kPa, nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60cm, totalizando 99 amostras. Essas funções foram classificadas como FPT pontuais, uma vez que, estima pontos específicos aplicados nas tensões de interesse para retenção de água no solo. O desempenho das Funções de pedotransferência foram analisadas graficamente pela relação 1:1, entre os dados estimados versus dados observados e por meio dos seguintes indicadores estatísticos: Coeficiente de correlação (r), Índice de concordância (d), Erro máximo (ME), Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RMSE), Coeficiente de massa residual (CRM), Erro absoluto médio (EAM), Índice de desempenho (c) e coeficiente de determinação (R^2). Os índices estatísticos, que avaliam os modelos gerados para estimar a umidade volumétrica no solo estudado, apresentaram valores que indicam elevado desempenho para a maioria das FPTs e boa correlação entre os valores observados e estimados nas tensões estudadas e em todas as camadas de solo analisadas. Assim, a estimativa da retenção de água no solo por meio da FPTs apresenta-se como uma alternativa para auxiliar as técnicas adotadas no manejo de irrigação da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Capacidade Preditiva, Potencial Mátrico, Stepwise, Pedofunções, Propriedades físico-hídricas do solo.

NASCIMENTO, Diógenes Virgínio. PEDOTRANSFER FUNCTIONS TO ESTIMATE MOISTURE IN CULTIVATED SOILS WITH SUGARCANE IN COASTAL FOREST REGION IN PERNAMBUCO. Dissertation. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE, 2015.

ABSTRACT

This work is related to knowledge of Pedotransfer functions (PTF), enabling an understanding about water soil content influenced by soil properties and analyzes to generate PTFs. This study aimed was proposed pedotransfer functions (PTF) based on hydro-physical soil properties and organic carbon to estimate soil moisture. The study was conducted in the area owned by Santa Teresa Plant in Goiana City, PE (7°36'56 "S 34°59'19" W) with sugarcane crop (*Saccharum* spp) irrigated by Lateral Move System. Field capacity (θ_{fc}) and wilting point (θ_{wp}) were assumed by dependent variables. Sand, silt, clay, soil bulk density and organic carbon were adopted as independent variables. Pedotransfer functions generated in this study estimate soil moisture to matric potential at -10 kPa, equivalent to θ_{fc} , in sandy soils and at -33 kPa to clay soils and matric potential at -1.500 kPa to θ_{wp} in 0-20; 20-40 e 40-60cm soil depth. These functions were classified as "Point PTF", since estimated specific points to matric potential to soil water retention. Statistical indices and graphic analyses (1:1 ratio) between model-predicted and observed data were used to evaluate PTFs performance. The following statistical indices were used: Correlation coefficient (r), Concordance index (d), Maximum error (ME), Square root mean squared error normalized (RMSE), Coefficient of residual mass (CRM), Mean absolute error (MAE), Performance Index (c) and Determination coefficient (R^2). Statistical indices that evaluate generated models to estimate soil water content indicated high performance for most of PTFs and good correlation between observed and estimated values at matric potential studied in all soil layers analyzed. Thus, retention water estimated by PTFs can be an interesting alternative to support irrigation management at sugarcane.

Keywords: Predictive Capacity, Matric Potential, Stepwise, Pedofunctions, hydro-physical soil properties.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores de (f) para cana-de-açúcar e diferentes valores de evapotranspiração máxima diária.....	26
Tabela 2	Funções de Pedotransferência desenvolvidas para solos no Brasil.....	36
Tabela 3	Classificação dos índices de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997).....	41
Tabela 4	Números dos lotes, área e número de pontos amostrados no campo experimental.....	43
Tabela 5	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 0-20cm e tensão de -10kPa.....	46
Tabela 6	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 20-40cm e tensão de -10kPa.....	47
Tabela 7	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 40-60cm e tensão de -10kPa.....	47
Tabela 8	Matriz de correlação entre as variáveis estudadas na camada de 0-20cm e tensão de -10kPa.....	48
Tabela 9	Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 20-40cm e tensão de -10kPa.....	48
Tabela 10	Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 40-60cm e tensão de -10kPa.....	49
Tabela 11	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 0-20cm e tensão de -33kPa.....	50
Tabela 12	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 20-40cm e tensão de -33kPa.....	51
Tabela 13	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 40-60cm e tensão de -33kPa.....	51
Tabela 14	Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 0-20cm e tensão de -33kPa.....	52
Tabela 15	Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 20-40cm e tensão de -33kPa.....	52
Tabela 16	Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 40-60cm e tensão de -33kPa.....	53
Tabela 17	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 0-20cm e tensão de -1.500kPa.....	53
Tabela 18	Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 20-40cm e tensão de -1.500kPa.....	54

Tabela 19 Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 40-60cm e tensão de -1.500kPa.....	55
Tabela 20 Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 0-20cm e tensão de -1.500kPa.....	55
Tabela 21 Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 20-40cm e tensão de -1.500kPa.....	56
Tabela 22 Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 40-60cm e tensão de -1.500kPa.....	56
Tabela 23 Índices estatísticos de desempenho dos modelos que predizem a umidade na capacidade de campo, obtidos nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60cm, sob tensões de -10 e -33kPa.....	57
Tabela 24 Índices estatísticos de desempenho dos modelos que predizem a umidade no ponto de murcha permanente, obtidos nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60cm, sob tensão de -1.500kPa.....	57
Tabela 25 Coordenadas geográficas e classificação textural das amostras de solo utilizadas na estimativa de retenção de água no solo na profundidade de 0-20cm.....	70
Tabela 26 Coordenadas geográficas e classificação textural das amostras de solo utilizadas na estimativa de retenção de água no solo na profundidade de 20-40cm.....	71
Tabela 27 Coordenadas geográficas e classificação textural das amostras de solo utilizadas na estimativa de retenção de água no solo na profundidade de 20-40cm.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção e consumo de açúcar mundial.....	17
Figura 2	Distribuição geográfica da cana-de-açúcar.....	18
Figura 3	Estádios fenológicos da cana-de-açúcar.....	19
Figura 4	Coeficiente de murchamento por argila (Briggs e Shantz, 1912).....	31
Figura 5	Lotes cultivados com cana-de-açúcar irrigada no Engenho Bujari pertencente à Usina Santa Tereza, Goiana/PE.....	43
Figura 6	Correlação entre os valores da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) preditos e observados equilibrados à tensão de -10kPa nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60cm.....	59
Figura 7	Correlação entre os valores da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) preditos e observados equilibrados à tensão de -33kPa nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60cm.....	60
Figura 8	Correlação entre os valores da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) preditos e observados equilibrados à tensão de -1.500kPa nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60cm.....	60
Figura 9	Utilização de GPS para coleta das amostras de solo nos pontos georreferenciados.....	74
Figura 10	Coleta de amostras de solo não deformada com amostrador tipo Uhland.....	74
Figura 11	Amostras saturadas e na câmara de Richards.....	75
Figura 12	Coleta das amostras de solo deformadas com o trado holandês.....	75
Figura 13	Análises de determinação de carbono orgânico.....	75

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas agrícolas mais importantes do Brasil, e atualmente possui uma área cultivada estimada em 9.004,5 mil hectares, que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2014/15 distribuídas em todos os estados produtores, apresentando um crescimento na área de 193,1 mil hectares para esta temporada o que equivale 2,2% em relação à safra passada. O Brasil produziu 634,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, tendo a produção de açúcar alcançado 35,56 milhões de toneladas e a produção de etanol 28,66 bilhões de litros na safra 2014/2015 (CONAB, 2015).

No Nordeste, Pernambuco é o segundo estado com maior produção de cana-de-açúcar, a estimativa para safra atual no estado, aponta uma moagem com esmagamento total em média de 14.522.658 toneladas de cana, e produção em torno de 1.037.867 toneladas de açúcar e 363.092 m³ de litros de etanol (SINDAÇÚCAR, 2015).

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é associado a toda sua história econômica, social e cultural, atualmente em algumas áreas cultivadas vêm sendo introduzida a técnica de irrigação constituindo como uma das alternativas que contribui para a qualidade total do processo de produção sucroalcooleiro.

A irrigação adequada proporciona condições de umidade do solo durante os estádios do ciclo da cultura, que reflete em maior produção e um produto de melhor qualidade, uma vez que a disponibilidade hídrica restrita no solo afeta negativamente o crescimento da planta e é uma das principais causas de redução de produtividade.

A região Nordeste possui cerca de um milhão de hectares plantados com cana-de-açúcar. Deste montante 492,67 mil ha são irrigados. Porém a região possui capacidade para expandir em 70% este importante manejo para o desenvolvimento da agroindústria canavieira (JORNALCANA, 2015). Diante da incontestável importância da cana-de-açúcar no cenário nacional, a realização de estudos visando a melhoria do processo produtivo da cultura é essencial à continuidade do desenvolvimento do setor canavieiro brasileiro.

No que concerne à disponibilidade hídrica no Nordeste, um dos principais entraves é o clima, pois é uma região de alta temperatura e elevada radiação solar associada à má distribuição de chuva que provocam efeitos de secas prolongadas,

tornando terrenos restritos a produção. Nesse contexto é importante o entendimento do uso da irrigação como ferramenta para aumento de produtividade.

O consumo da água da cana-de-açúcar varia em função do estágio fenológico, do ciclo da cultura, se é cana planta ou soca, das condições climáticas, entre outros fatores, como variedade e água disponível no solo.

Para determinar um manejo de irrigação adequado o conhecimento de atributos físico-hídricos do solo são importantes, pois eles influenciam diretamente o armazenamento de água no solo e sua disponibilidade às plantas (MICHELON, et al. 2010).

A retenção de água no solo é um indicativo para vários estudos, tais como, disponibilidade de água, balanço de água no solo, infiltração e manejo de irrigação. Este atributo auxilia no planejamento do manejo de irrigação, visando contribuir com o aumento da produção da cultura, pois permitirá definir uma frequência ideal de irrigação.

Sendo uma variável de entrada que rege os modelos para estimar as relações solo-água, a retenção de água no solo descreve a relação entre o potencial da água e o conteúdo volumétrico de água no solo, que é uma característica intrínseca de cada tipo de solo. Ela pode ser usada para estimar o armazenamento de água relacionado com a capacidade de suprimento hídrico para as culturas (COSTA, 2012). Consequentemente, é dependente de alguns atributos físicos no solo, como a textura do solo, densidade do solo, teor de umidade no solo, capacidade de campo e ponto de murcha permanente, como também de atributos químicos, a exemplo do carbono orgânico do solo.

O estudo destes parâmetros tem ligação direta com o manejo racional do uso da água em sistemas irrigados, tornando-se uma ferramenta para fornecer tanto o momento quanto a quantidade de água a se aplicar.

Existem métodos diretos e indiretos para a determinação da retenção de água no solo. Os métodos diretos estão caracterizados por apresentar procedimentos que mede os valores de umidade e potencial de água no solo, a partir de amostras deformadas ou não deformadas, determinadas em laboratório ou a campo. Entretanto, as mensurações das propriedades hídricas do solo no campo e no laboratório, são de difícil determinação devido ao elevado custo para realização das análises, demanda de tempo e mão-de-obra.

O custo efetivo para obtenção do conteúdo de água no solo em determinados potenciais pode ser reduzido usando métodos indiretos. Um desses métodos é baseado a partir de parâmetros físicos do solo de difícil medição, para obter equações, onde são

utilizadas outras propriedades que sejam de fácil medição, amplamente disponíveis, rotineiramente medidas com baixo custo para determinação. Estas equações são denominadas Função de Pedotransferência (Pedotransfer Function), termo proposto inicialmente por Bouma (1989), com o significado de “transformar dados que possuímos em dados que necessitamos”. Funções de pedotransferência permitem que informações básicas de solo, sejam transformadas em outras, de obtenção mais laboriosa e mais cara, além de permitir estimar as características hidrodinâmicas do solo a partir de propriedades básicas do solo, tornando as determinações relativamente fáceis e muitas vezes comparadas com a existente na bibliografia e também com dados locais segundo Budiman et al. (2003).

Existem vários métodos para determinação das FPTs, desde regressão linear múltipla, modelos lineares generalizados, modelos aditivos generalizados, árvore de regressão, redes neurais, sistemas de lógica difusa, (SOARES, 2013). Porém, todas elas têm que obedecer a princípios gerais como: não predizer o atributo que é mais fácil e mais barato de se obter que o preditor, e ao prever uma variável, essa deve ter alguma relação casual com o preditor, pois desenvolver uma FPT não é um exercício estatístico conforme Budiman, et al. (2003). O pesquisador deve entender o solo e usar seu conhecimento para selecionar uma lógica na predição conforme Minasny e Hartemink (2011). Oliveira et al. (2002) ressalta também que uma FPT não deve ser explorada além da região onde foi desenvolvida, no intuito de diminuir os erros da predição do atributo estimado, pois quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados das FPTs, melhor será o desempenho das mesmas.

Nos últimos anos vem surgindo um elevado número de equações, que visam a estimativa de retenção de água para solos do Brasil. Essas equações quando avaliadas pelo seu coeficiente de determinação, apresentam boa predição para a elaboração de Funções de Pedotransferência.

Cada vez é maior a busca pelo aprimoramento das FPTs que visam estimar a umidade do solo sob diferentes potenciais matriciais, a fim de auxiliar as técnicas adotadas no sistema de irrigação.

1.1 HIPÓTESE

(1) Funções de pedotransferências, desenvolvidas para estimar o conteúdo de água retida no solo sob determinadas tensões, quando geradas com base nas frações granulométricas, densidade do solo e carbono orgânico conseguem expressar resultados com precisão.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver funções de pedotransferência para estimar o conteúdo de água no solo a partir das frações granulométricas (areia, silte e argila), densidade do solo e teor de carbono orgânico, em solos cultivados com cana-de-açúcar na zona da mata norte de Pernambuco, como mais uma opção de estimar umidade do solo e auxiliar o manejo da irrigação.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar os teores de umidade, em solos cultivados com cana-de-açúcar irrigada, equivalente à capacidade de campo e ponto de murcha permanente para subsidiar a geração de Funções de Pedotransferência;
- ✓ Desenvolver Funções de Pedotransferência do tipo pontual nas camadas de solo com profundidade de 0-20, 20-40, 40-60cm com diferentes classes texturais a partir de dados de granulometria, densidade do solo e teor de carbono orgânico em solos cultivados com cana-de-açúcar nos Tabuleiros costeiros do Estado de Pernambuco;
- ✓ Avaliar o efeito do carbono orgânico na FPT para retenção de água no solo.
- ✓ Analisar a influência relativa das diferentes variáveis preditoras envolvidas no processo de retenção de água no solo para potenciais específicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

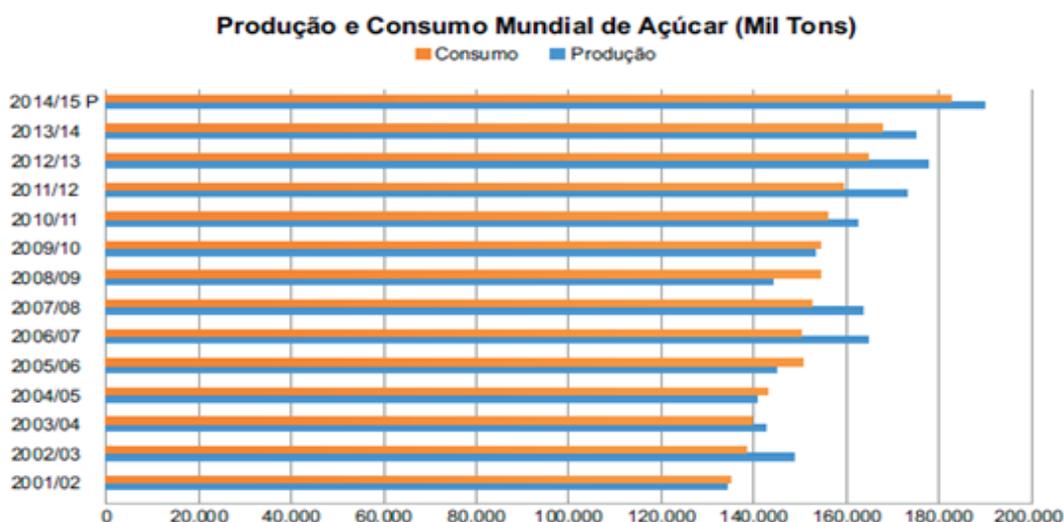
2.1 CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR: CICLO FENOLÓGICO E ASPECTOS ECONÔMICOS

A atividade sucroalcooleira no Brasil envolve números expressivos, pois se trata de uma das atividades de maior importância no âmbito econômico e social do país e coloca o Brasil como líder mundial nas agroindústrias de açúcar e álcool. Nos últimos anos, a área produtiva bem como a produtividade total, tem aumentado continuamente, devida às boas perspectivas do mercado futuro (CHRISTOFFOLETI et al., 2005).

Em Pernambuco, o setor sulcrocrocroleiro ocupa uma área de 260,1 mil hectares na safra 2014/2015 gerando cerca de 120 mil empregos diretos, nas áreas rural e industrial, proporcionando desta forma, grande contribuição social (CONAB, 2015). Além disso, é uma das culturas como matéria prima de grande flexibilidade, uma vez que da cana-de-açúcar aproveita-se praticamente tudo: bagaço, melaço, torta de filtro e resíduos de colheita (UNICA SÃO PAULO, 2006).

Segundo a Coinvalores (2015), o setor encontra-se em crescimento, com possibilidade de expressiva representatividade do mercado do açúcar e do etanol, apesar da conjuntura desafiadora, aferiram moderada melhora nas perspectivas para 2015. O Brasil responde por aproximadamente 46% das exportações mundiais de açúcar e a tendência é de que o país mantenha esta posição, haja vista a necessidade de produção para a crescente população mundial (Figura 1).

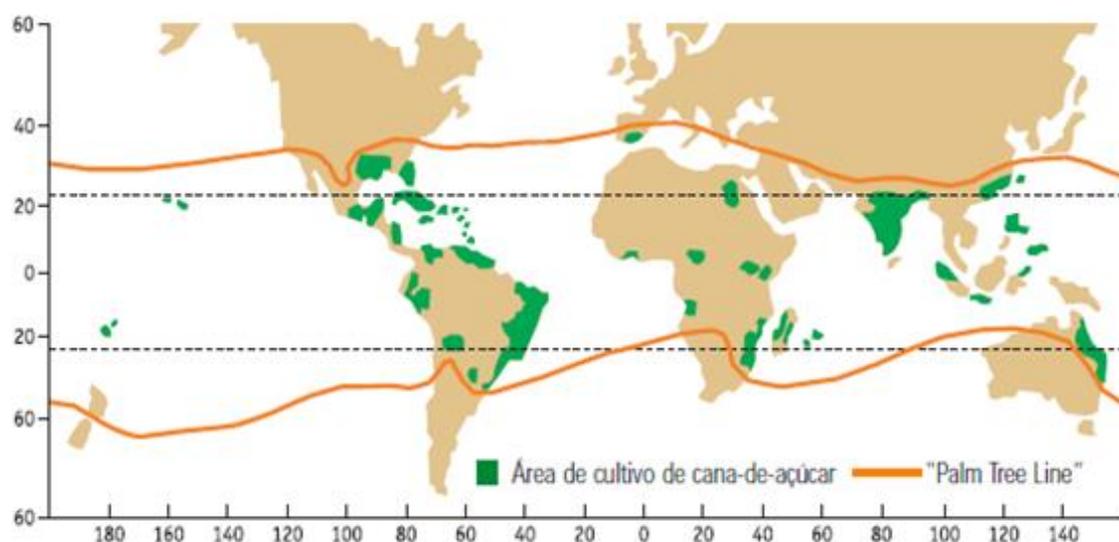
Figura 1 - Produção e consumo de açúcar mundial



Fonte: USDA – United States Department of Agriculture citado por Coinvalores (2015).

O cultivo da cana-de-açúcar existe em todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo e se estende ao Norte e ao Sul do Equador, seguindo a distribuição das palmeiras (“Palm Tree Line”, ou linhas que delimitam a zona de crescimento das palmeiras e que caracterizam a zona tropical). Como a cana-de-açúcar se adapta facilmente e é capaz de crescer em uma vasta faixa de habitat e altitudes (Figura 2), tanto nos trópicos quanto em regiões temperadas, ela está atualmente dispersa em todos os continentes (MARQUES, 2009).

Figura 2 - Distribuição geográfica da cana-de-açúcar



Fonte: Marques (2009).

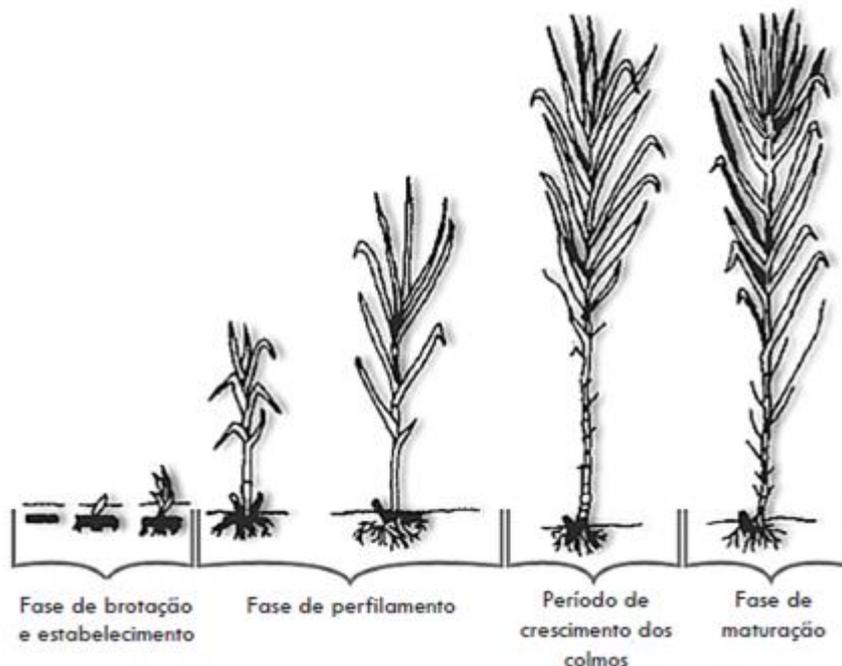
No Brasil as principais regiões brasileiras produtoras são Nordeste e Centro-Sul, o que permite dois períodos de safra, de setembro a abril e de abril a novembro, respectivamente, proporcionado o desenvolvimento da cultura canavieira nas mais variadas condições climáticas (CRUSCIOL et al., 2010).

Para atingir a alta produção de matéria seca e de sacarose, o manejo da época de plantio é importante. Assim, a planta se desenvolve durante o período em que as condições de temperatura e umidade adequadas permitem o máximo crescimento na fase vegetativa e inicia o acúmulo de sacarose nos colmos favorecido pelo período em que há restrição hídrica ou térmica (TERAMOTO, 2003).

O conhecimento da dinâmica fenológica é indispensável para a elaboração de estratégias de conservação e manejo de uma cultura. Segundo Crusciol et al. (2010), a cana-de-açúcar apresenta quatro diferentes sub-períodos ou estádios em sua fenologia (Figura 3), conhecidos por: Fase de Brotação e estabelecimento (colmos primários);

Fase de Perfilamento (da emergência dos brotos ao final do perfilamento); Período de Crescimento dos colmos (do perfilamento final ao início de acumulação da sacarose), e Fase de Maturação (intensa acumulação de sacarose nos colmos).

Figura 3 - Estádios fenológicos da cana-de-açúcar



Fonte: Crusciol et al. (2010)

Um fator importante que corresponde ao crescimento da cana-de-açúcar é a disponibilidade de água ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, no qual dados obtidos por Scarpate (2011) evidenciam que se ocorrer estresse hídrico durante o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, haverá restrição dos processos fisiológicos como divisão celular e alongação, o que causaria danos como a diminuição na produtividade.

Essa disponibilidade hídrica no ciclo da cana-de-açúcar reflete no processo produtivo canavieiro visando três objetivos básicos, de acordo com Segato et al., (2006): **Produtividade**, apresentando alta produção de fitomassa por unidade de área, isto é, elevado rendimento agrícola de colmos industrializáveis, em cujas células parenquimatosas é armazenada a sacarose; **Qualidade**, ponto ótimo de riqueza em açúcar dos colmos industrializáveis, caracterizando matéria-prima de qualidade; **Longevidade do canavial**, visa aumentar o número de cortes econômicos, refletindo-se num prazo maior de tempo entre as reformas do canavial, resultando em melhor economia do empreendimento.

2.2 INFLUÊNCIA NA RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PELAS PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS E CARBONO ORGÂNICO

O solo é formado pela parte sólida (mineral e orgânica) e pelo espaço poroso (água e ar), a parte sólida representa a constituição matricial do solo, na qual a fração mineral é representada por partículas de tamanhos variados que definem a textura do solo onde podem ser divididas em três frações, conforme o tamanho: areia (2-0,05mm), silte (0,05-0,002mm) e argila (< 0,002mm), embora seja comum a ocorrência de materiais com dimensões maiores, como cascalhos (2mm - 2cm), calhaus (2cm - 20cm) e matacões maior que 20cm (BRADY e WEIL, 2008).

A fração orgânica do solo é constituída por organismos vivos ou na forma de compostos, em estádios variados de decomposição, enquanto que as fases líquidas e gasosas dividem no solo através do espaço poroso. É fundamental buscar no solo o equilíbrio entre as porosidades de aeração e de retenção de água (CAVALCANTI, 2008).

A retenção da água no solo é influenciada por um grande número de fatores relativos ao solo e as condições a que ele é submetido. Dentre os fatores que interferem no processo de retenção da água no solo estão as propriedades físicas do solo, por meio da textura e da estrutura, sendo o tamanho das partículas que estão relacionados com a movimentação da água no solo, além da quantidade de carbono orgânico, os atributos mais importantes (SILVA e KATO, 1998).

A retenção de água no solo é afetada pela textura do solo de forma que quanto maior for o conteúdo de argila, maior será o teor de água retida sob um dado potencial matricial. Já em solos arenosos normalmente os poros são maiores, sendo mais rapidamente esvaziados restando pequenas quantidades de água retidas a potenciais menores (SOARES, 2013). Isso é explicado pelo fato do solo argiloso possuir poros menores quando comparados ao solo arenoso, além disso, possuem maior porcentagem de material coloidal e o mecanismo de adsorção ocorre de forma mais intensa em solos de textura fina (PEREIRA, 2004).

A variação do solo no campo com relação à textura causa diferenças na quantidade de água armazenada. Entretanto, não se pode prever sempre para todas as classes de solo a retenção de água somente a partir da textura, isso porque, além dela outros fatores importantes devem ser considerados, principalmente a mineralogia, matéria orgânica e estrutura (MESQUITA e MORAIS, 2004).

Um fator relevante que pode explicar a retenção de água é a composição mineralógica do solo. Alguns argilo-minerais, por exemplo, os 2:1 têm maior de retenção de água, como as esmectitas, vermiculitas e ilitas, ao contrário da caulinitas. Além disso, outros processos básicos influenciam na retenção de água no solo como: (1) capilaridade – ocorre nos poros menores que $30\mu\text{m}$ e é influenciada pela textura e estrutura do solo e (2) adsorção – ocorre 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 (MEDEIROS, 2012). Segundo Reichardt e Timm (2004), a fração do solo que mais decisivamente determina seu comportamento físico é a fração argila. Pela grande área específica é a fração mais ativa em processos físicos e químicos que ocorrem no solo.

Partículas de areia são relativamente grandes, deste modo, os espaços entre elas possuem um diâmetro relativamente grande, promovendo a drenagem livre da água e entrada de ar no solo. Devido ao seu maior tamanho, partículas de areia têm superfície específica relativamente baixa. Deste modo, apresentam pequena capacidade de retenção de água e, solos com predominância desta fração são mais propensos a serem deficientes em umidade em períodos de estiagem (MARCOLIN, 2009).

Os poros entre as partículas de silte são menores, e muito mais numerosos, que aqueles presentes entre partículas de areia, deste modo, o silte retém mais água e permite uma menor drenagem. Entretanto, quando seca, a fração silte exibe pouca pegajosidade ou plasticidade (maleabilidade). A plasticidade, coesão (viscosidade) e capacidade de adsorção que algumas frações de silte apresentam é, em grande parte, devido a filmes de argila aderidos à superfície das partículas. Devido à sua baixa pegajosidade e plasticidade, solos siltosos, de maneira geral, são facilmente carregados por fluxos de água (BRADY e WEIL, 2008).

A matéria orgânica é um bom indicador da qualidade do solo e, mesmo não sendo uma propriedade física, influência direta e indiretamente a maioria delas e se relaciona com outras propriedades químicas e hídricas no solo. O seu teor está diretamente relacionado com o estoque de carbono orgânico do solo, sendo assim, quanto maior o conteúdo de carbono orgânico de um solo, maior será o teor de matéria orgânica (GIMENES, 2012).

A matéria orgânica, devido a sua alta capacidade adsortiva e a sua influência sobre a estrutura do solo e sobre a porosidade, aumenta a capacidade de retenção de

água no solo diretamente e indiretamente sobre as condições das características físicas do solo (SILVA, 2014).

A variação na estabilidade de agregados em diferentes sistemas de cultivo pode ser atribuída a diferenças no teor de carbono orgânico do solo. A agregação do solo promove maior proteção física da matéria orgânica no solo, proporcionando aumento na estabilidade de micro agregados. A quebra de agregados expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico no solo. Solos com alto teor de matéria orgânica têm maior capacidade de retenção de água. A retenção de água é mais afetada na proporção de carbono orgânico na tensão de -33kPa em relação a tensão de -1.500kPa (RAWLS et al. 2003).

A estrutura determina o arranjo das partículas, que, por sua vez, vai determinar a distribuição de poros, afetando na retenção de água no solo em maior ou menor proporção (SOARES, 2013). Em elevados potenciais matriciais, as forças capilares são mais atuantes e, nesses potenciais, a retenção de água é influenciada pela estrutura do solo. Por outro lado, em potenciais mais baixos, a retenção de água depende dos fenômenos de adsorção, os quais são mais influenciados pela textura e superfície específica das partículas (MICHELON, 2010).

A retenção de água no solo pode ser definida como a variação da sucção com a capacidade de retenção de água a partir do grau de saturação e umidade volumétrica (θ_v). Utilizam-se amostras na condição de saturação e aplicam-se tensões sucessivas, de forma a expulsar a água do material com o objetivo de avaliar a sucção matricial em função da umidade do solo (PEREIRA, 2004).

As variáveis físico-hídricas e o carbono orgânico do solo fornecem informações para o estabelecimento de sistemas de manejo de solo-água e para modelagem hidrológica nos projetos de irrigação. Através do conhecimento da capacidade de retenção de água se determina a disponibilidade hídrica do solo para a cultura (OTTONI, 2005).

2.3 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO SOLO PARA CANA-DE-AÇÚCAR

A disponibilidade hídrica desempenha papel fundamental na produção da cana-de-açúcar, já que existe uma correlação entre seu consumo hídrico e a produção de colmos. Nos períodos iniciais do ciclo, Fase de brotação e estabelecimento, Fase de perfilhamento, a demanda hídrica é mais intensa. No crescimento vegetativo o efeito da

água no ciclo da cultura diminui, chegando a ser quase insignificante no período de maturação (SCARPARE, 2011).

De acordo com Maule et al. (2001), a disponibilidade de água no solo governa a produção vegetal, sendo que sua falta ou seu excesso afeta de maneira significativa o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Grande parte das atividades agrícolas é dependente da distribuição das chuvas, visto que predominam sistemas de produção de sequeiro, nos quais perdas por eventos do clima são elevados. A água é responsável pelo equilíbrio das relações solo-planta, que devem ser mantidas em teores equivalentes à capacidade de campo ou ao limite superior de água útil ou disponível (LOPES-ASSAD e MARTINHO, 2006).

A umidade volumétrica no solo é uma variável importante que indica quanta água um dado volume de solo pode reter. No entanto, para entender o movimento da água no solo, devem-se entender as forças que agem sobre a água, que afetam sua energia potencial. Sendo assim, a energia livre da água no solo é reduzida das seguintes formas: em umidades relativas baixas; em solos com minerais de argila do tipo 2:1; em função do tipo de poros, pois enquanto camadas de água se acumulam, a água começa a preencher os menores poros e vazios entre partículas de solo, formando meniscos curvos água-ar; em função dos solutos e conseqüentemente do potencial osmótico (WHITE, 2009).

Geralmente o consumo hídrico da cana-de-açúcar varia em função da área foliar, do estágio fenológico, do ciclo da cultura (cana planta ou cana soca), das condições climáticas, da densidade do sistema radicular, da água disponível do solo entre outros fatores (SCARPARE, 2011).

De acordo com Bernardo (2006) o consumo diário de água da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil, em geral, varia entre 2,0 e 6,0 mm/dia, sendo os dois primeiros estágios (3 a 4 meses) os mais críticos em relação ao déficit hídrico. Deste modo a cultura da cana-de-açúcar requer, em média, uma lâmina de 180 mm/mês.

Alguns parâmetros utilizados na disponibilidade da água no solo, são: Capacidade de campo sendo o limite superior de água no solo, sendo a máxima quantidade de água que o solo pode reter sem causar danos ao sistema. Ponto de murcha permanente é o limite inferior de água no solo, neste ponto a água já não está mais disponível às plantas, na qual a força de retenção que o solo exerce sobre a água é maior do que a capacidade da planta em absorvê-la (MANTOVANI, 2009).

A água disponível (AD) para as plantas têm sido definida, tradicionalmente, como a diferença entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A determinação dessas características, dentre outras, é de fundamental importância no planejamento de uso racional do solo e da água. Na maioria das situações é inferido que o solo se encontra na CC quando o potencial matricial está em torno de -33kPa para solos de textura argilosa, -10kPa para solos de textura arenosa e no PMP quando o potencial matricial está em torno de -1.500kPa (COUTO, 2002).

2.4 MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA CANA-DE-AÇÚCAR

A irrigação é uma operação agrícola que tem por finalidade suprir as necessidades da cana, essa técnica não funciona isoladamente, mas sim conjugada com outras práticas de manejo. Existem diversas técnicas de manejo da irrigação na cana-de-açúcar: irrigação de salvação, irrigação com déficit hídrico controlado, irrigação suplementar e irrigação total. Os métodos mais utilizados na cultura da cana-de-açúcar são: aspersão, superfície e localizada, haja vista que um bom programa de irrigação pode beneficiar a cultura com benefícios diretos aumentando sua produtividade; permitindo maior eficiência no uso de fertilizantes; elaboração de uma escala de plantio que possibilite a obtenção de duas ou mais colheitas por área ao ano; minimizando o risco de investimentos na agricultura, além da longevidade das soqueiras e dos benefícios indiretos relacionados com a redução de custos no processo produtivo agrícola (SANTOS, 2005).

Sobre o manejo de irrigação na cana-de-açúcar, duas questões estão permanentemente em discussão: (1) qual a lâmina deve ser aplicada; e (2) quando irrigar, pois longos intervalos entre irrigações podem criar um elevado déficit de água no solo e, conseqüentemente um estresse hídrico na cultura, prejudicando a exploração do máximo potencial produtivo da cultura irrigada (BERNARDO, 2006).

A capacidade de retenção de água de um solo é importante para resolução de problemas envolvendo irrigação e permitem conhecer a variação do potencial de água no solo, na faixa de água disponível às plantas, e nos estudos de movimento de água no solo, pois fornece o teor de água do solo em diferentes tensões (COSTA et al., 2008).

Segundo Mantovani et al. (2009), um dos parâmetros que auxiliam na estratégia de manejo de irrigação é o entendimento da Capacidade de água disponível (CAD)

considerada a parte da água armazenada no solo que está disponível para as plantas e definida pelo intervalo entre a Capacidade de campo e o Ponto de murcha permanente do solo, densidade do solo e considerando a profundidade efetiva do sistema radicular (Equação 1).

$$CAD = \frac{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})}{10} \times D_s \times Z \quad (1)$$

Onde: CAD = Capacidade de água disponível, mm
 CC = Capacidade de campo, cm³/cm³
 PMP = Ponto de murcha permanente, cm³/cm³
 D_s = Densidade do solo, g/cm³
 Z = Profundidade efetiva do sistema radicular, cm

A determinação da CAD é trabalhosa de elevado custo e mão de obra, assim, uma maneira de minimizar esses esforços e custos é através da obtenção da estimativa da Umidade Volumétrica na Capacidade de campo (θ_{cc}) e no Ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) a partir de métodos indiretos. Um método indireto para estimativa da retenção da água nos solos é através de Funções de Pedotransferência, as quais descrevem equações que expressam dependências da retenção da água no solo (SOARES, 2013).

Para agricultura irrigada, não é viável planejar a irrigação no momento que o solo atinge o Ponto de murcha permanente, assim se define um limite entre a Capacidade de campo e o Ponto de murcha permanente, o fator de disponibilidade de água no solo ou fator (f). Este é um parâmetro que limita a parte da água disponível do solo que a planta pode utilizar sem causar maiores prejuízos à produtividade (Tabela 1). A demanda hídrica no solo para a cultura pode ser determinada, a partir do produto da equação da Capacidade de água disponível (CAD) e o fator (f) denominado fator de disponibilidade hídrica (MANTOVANI, 2009).

Cada cultura tem capacidade específica, em termos de energia disponibilizada para o processo de absorção de água. A evapotranspiração máxima (ET_m) é o consumo hídrico para manter a cultura sem deficiência e conforme a evapotranspiração aumenta, maior quantidade de energia é gasta pela cultura. No intuito de se estabelecer os valores de disponibilidade de água no solo ou fator (f), que é um parâmetro que limita a parte da água disponível do solo que a planta pode utilizar, sem causar maiores prejuízos à produtividade, a cana foi agrupada de acordo com as suas especificidades fisiológicas e a sua evapotranspiração máxima diária (Tabela 1). O valor do fator (f) pode variar com o período vegetativo e geralmente é maior na fase de maturação devido à baixa

evapotranspiração. Quando se fala que o fator (f) é 0,6 indica que a cana-de-açúcar consegue retirar 60% da água disponível no solo para a manutenção da cultura, sem o risco de entrar em estresse hídrico: este é o ponto crítico. Assim, sempre que for consumido 60% da CAD, a irrigação será efetuada. Caso isso não ocorra, fatalmente a cultura começará a ficar com restrição de água (AFFÉRI et al., 2010).

Tabela 1 - Valores de (f) para cana-de-açúcar e diferentes valores de evapotranspiração máxima diária

Grupo: Cana-de-açúcar	ETm (mm/dia)								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fator (f)	0,88	0,80	0,70	0,60	0,55	0,50	0,45	0,43	0,40

Fonte: FAO adaptado por Afféri et al. (2010).

Com a obtenção da estimativa da Umidade Volumétrica na Capacidade de campo (θ_{cc}) e a Umidade Volumétrica no Ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) por meio de métodos indiretos, através de Funções de Pedotransferência, pode-se determinar a Irrigação Real Necessária (IRN) por meio do produto entre a Capacidade de água disponível (CAD) e o fator (f). Dessa forma, é definida a quantidade de água requerida, para que a cultura se desenvolva sem déficit naquele determinado solo. Ela deve ser inferior ou igual à Capacidade real de água no solo (CRA) que tem o valor igual ao produto entre a Capacidade de água disponível (CAD) e o fator (f), normalmente em sistemas que envolvem muita mão de obra nas mudanças diárias (aspersão, autopropelido, etc.) procura-se fazer ($IRN = CRA$), já em sistemas de movimentação automática (pivô central, pivô linear lateral, irrigação localizada), os valores são ($IRN < CRA$), sendo possível estimar correspondente a Lâmina líquida de irrigação de quando e quanto aplicar. Desta forma as Funções de Pedotransferência podem auxiliar a tomada de decisão no manejo de irrigação, (MANTOVANI, 2009).

A equação que descreve esse parâmetro é a seguinte:

$$IRN \leq CAD \times f \quad (2)$$

Onde: IRN = irrigação real necessária, mm.

f = fator de disponibilidade hídrica.

Deste modo, o estudo de métodos indiretos como Funções de Pedotransferência a partir de parâmetros físico-hídricos e carbono orgânico do solo tem relação direta com manejo racional em sistemas irrigados, uma vez que auxilia o irrigante na determinação da lâmina de irrigação a ser aplicada (SOARES, 2013).

2.5 ATRIBUTOS UTILIZADOS PARA SE DESENVOLVER FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

2.5.1 Análise Granulométrica

A granulometria é uma característica do solo que mensura as proporções relativas das frações areia, silte e argila. Esse atributo varia muito pouco no tempo e no espaço, pois são características consideradas estáveis e inerentes ao solo. Solos com teor de argila intermediário, em razão das suas propriedades químicas e físicas, são melhores para fins agrícolas, uma vez que a distribuição do tamanho das partículas do solo interfere diretamente no grau de compactação, na capacidade de troca de cátions, dosagem de nutrientes e corretivos e na disponibilidade de água (KLEIN, 2012).

A granulometria é uma importante propriedade do solo a ser considerada no manejo da irrigação porque influencia vários processos relacionados com o desenvolvimento do sistema radicular e com a fisiologia das plantas. Solos de textura argilosa e média, tal como argila, argila franca, argila siltosa e argila franco siltosa, possuem uma retenção de água maior do que solos com textura arenosa (WHITE, 2009).

O tamanho e a forma do espaço poroso do solo são, portanto, fatores importantes a se considerar quando se investigam propriedades de retenção e condução de água (BRADY e WEIL, 2008).

Uma grande quantidade de metodologias utilizadas para elaboração em análises granulométricas está disponível na literatura, cerca de 400 métodos são atualmente conhecidos (LOVELAND e WHALLEY et al., 2000).

De modo geral, os diferentes métodos incluem: peneiramento, peneiramento combinado com sedimentação e os métodos de sedimentação (RYZAK et al., 2007). No método atribuído usualmente por peneiramento, as partículas de solo após dispersão, são passadas em peneiras com malha de 53 μ m no caso da separação da areia das outras frações (ALMEIDA, 2008).

No método de sedimentação o tamanho das partículas é determinado com base na medida do seu tempo de queda numa solução. O método considerado padrão no Brasil é o método do hidrômetro, também conhecido como método de Bouyoucos, o qual se baseia no princípio da taxa de sedimentação ser proporcional ao tamanho da partícula do solo. Desse modo, as partículas de areia sedimentam mais rápido que as de silte que por sua vez sedimentam mais rápido que as de argila (ELLIOTT et al., 1999).

O programa computacional Texture AutoLoockup – TAL, versão 4.2 (TAL, 2008) é utilizado para fins de classificação textural dos solos obtida a partir dos resultados das frações granulométricas e pelo uso do triângulo textural do solo, selecionando o sistema de classificação Canadense, no qual as classes de texturas são as mesmas empregadas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SANTOS et al., 2005).

2.5.2 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) é definida pela razão entre massa de solo seco e o volume total desta amostra. Seus valores são eficazes no estudo das transformações que ocorrem no solo especialmente na quantificação da compactação dos perfis que varia com a umidade no solo (REICHARDT e TIMM, 2004). Por isso, a densidade e a umidade são consideradas indicadores da qualidade do solo, ou seja, a capacidade deste em proporcionar as condições adequadas à produtividade da cultura. Desse modo, a determinação da D_s poderá subsidiar a tomada de decisão quanto ao uso do solo a ser adotado (CARVALHO et al., 2007; MARCOLIN e KLEIN, 2011).

Segundo Costa et al. (2008), a densidade do solo tende a aumentar com a profundidade, o que se deve a fatores como: teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, menor penetração de raízes, maior compactação ocasionada pelo peso das camadas subjacentes, diminuição da porosidade total devido a eluviação de argila, entre outros. Existem inúmeros métodos de determinação da D_s que podem ser agrupados em métodos destrutivos e não destrutivos.

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

Silva (2014) avaliou algumas propriedades físicas referentes à densidade do solo, disponíveis em relatórios de levantamentos de solos e estabeleceram relações entre a equação de van Genuchten e parâmetros de retenção de água.

2.5.3 Carbono Orgânico no solo

O carbono orgânico do solo é constituído de microrganismos, húmus estabilizado, resíduos vegetais e animais em vários estádios de decomposição e carbono inerte (carvão vegetal e, ou, mineral). Solos agrícolas contêm 0,2 a 5,0 % de carbono (SILVA, 1999).

Um fator que interfere fortemente na qualidade do solo são os teores de matéria orgânica e carbono orgânico, os quais exercem também grande influência na estrutura do solo, por atuarem na estabilidade de agregados. A matéria orgânica tem a capacidade de aumentar a retenção de água no solo, isto faz com que a resistência à penetração diminua, ocasionando mudanças no arranjo das partículas do solo, aumentando, assim, a macroporosidade (TORMENA et al., 2002).

Dentre os métodos de determinar o carbono orgânico em amostras de solo, os métodos considerados padrão são combustão a seco, devido a sua alta precisão e exatidão nos resultados (RHEINHEIMER et al., 2008), e o método de combustão úmida o mais acessível, apesar de utilizar reagentes muito tóxicos, esses métodos baseiam-se na redução do dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7^{-2}$) por compostos de carbono orgânico e subsequente determinação do $K_2Cr_2O_7^{-2}$ não reduzido por titulação e oxirredução com Fe^{+2} ou por técnicas colorimétricas.

O método Walkey-Black, expressa o método de combustão úmida descrito em Mendonça e Matos (2005), o carbono orgânico é determinado por oxidação da matéria orgânica pelo dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7^{-2}$) em meio ácido como agente oxidante e a participação de uma fonte externa de calor assegurando que 100% do carbono seja oxidado, utiliza-se por meio de oxidação via úmida devido a sua simplicidade e pouco requerimento de equipamentos.

A distribuição do conteúdo de carbono orgânico no solo a partir de profundidade é uma informação essencial para permitir entender o seu processo na sensibilidade da estrutura do solo devido as mudanças no conteúdo de carbono orgânico, e funciona como uma variável independente das FPTs na estimativa de umidade do solo (JEUNE, 2012).

2.5.4 Umidade do solo

Os três principais critérios utilizados para determinar a umidade no solo são conhecidos como capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD). A diferença entre os teores de água retidos na CC e no PMP é tida como água disponível (EMBRAPA, 2011).

A capacidade de retenção de água no solo pode ser realizada de forma tradicional, em laboratório, utilizando amostras não deformadas ou deformadas de solo fazendo uso da clássica metodologia da mesa de tensão ou câmaras de pressão (RICHARDS, 1965). Este parâmetro permite estabelecer a quantidade de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potenciais matriciais, interpretando as características do armazenamento de água. Dentre os fatores que afetam a retenção da água em um solo, estão o teor de matéria orgânica, a textura do solo e a mineralogia da fração argila, pois estas determinam a área e a intensidade de contato entre as partículas sólidas e a solução do solo, bem como as proporções de poros de diferentes tamanhos (BRADY e WEIL, 2008).

Existe uma demanda por estudos que possibilitem o entendimento do comportamento da retenção de água no solo afim de minimizar os problemas relacionados ao manejo da água em sistemas agrícolas. Modelos que relacionam o potencial matricial de água no solo com o conteúdo de água retido pelo mesmo como Arya e Paris (1981) e Van Genuchten (1980), têm auxiliado com indicadores diretos e indiretos do comportamento de outras propriedades do solo, além de possibilitar a quantificação do conteúdo de água disponível para às plantas.

A técnica mais usada para determinar o conteúdo de retenção de água no solo é o princípio da câmara proposta por Richards (1965), que corresponde à uma câmara de pressão hermeticamente fechada. Esta câmara possui internamente uma placa porosa, onde é permitido a partir do tamanho dos poros, dentro de certos limites, somente o fluxo de água e não o de ar. A placa conhecida como placa de alta pressão de entrada de ar, é o elemento chave para o controle do potencial matricial da água neste equipamento. Com esta técnica é possível determinar a retenção de água no solo em amostras de estrutura não deformadas e deformadas.

As limitações inerentes aos métodos convencionais se devem à elevada ocupação de espaço físico nos laboratórios, a forte dependência da habilidade da pessoa responsável por operar os equipamentos e o elevado tempo necessário para

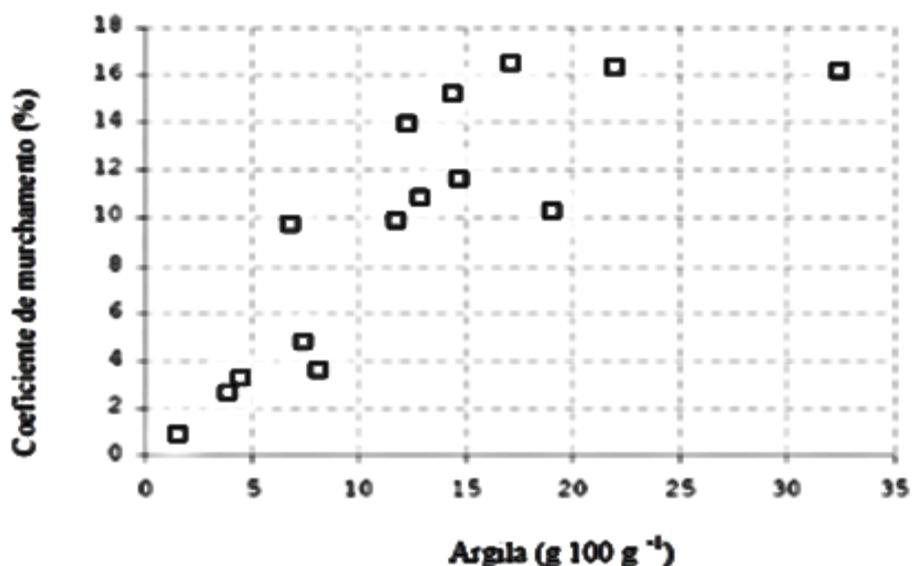
determinação da curva de retenção (SOARES, 2013). Além disso, problemas como custo, morosidade e inexatidão, ainda persistem (OLIVEIRA et al., 2002). Diante deste cenário, surge um crescente interesse pelo estabelecimento de métodos indiretos como Funções de Pedotransferência para estimar a CC, PMP e a CAD.

2.6 HISTÓRICO DAS FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA NA HIDROLOGIA DO SOLO

O conceito de função de pedotransferência (FPT) não era formalmente designado até 1989, mas a utilização de funções para estimar propriedades do solo já era realizada muito antes do surgimento do conceito de FPT.

As primeiras FPTs remetem ao estudo de Briggs e Mclane (1907 apud COSTA, 2012, p.38) e posteriormente refinado por Briggs e Shantz (1912 apud COSTA, 2012, p.38), quando propuseram a existência de correlação entre o teor de água no solo e a granulometria. Além disso, eles determinaram o coeficiente de murchamento como uma função do tamanho de partículas (Figura 4). Este coeficiente foi definido como o conteúdo de água de um solo (em porcentagem) em que as plantas que crescem nesse solo são primeiramente levadas a uma condição de murcha, na qual elas não podem mais se recuperar quando colocadas em uma atmosfera aproximadamente saturada com vapor de água, sem a adição de água no solo.

Figura 4 - Coeficiente de murchamento por argila (Briggs e Shantz, 1912)



Fonte: Costa (2012)

No período de 1950 a 1980, com a introdução do conceito de Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP) por Veihmeyer e Hendricksen (1927 apud COSTA, 2012, p.39), as pesquisas tentaram correlacionar a distribuição do tamanho das partículas do solo, porosidade, densidade e matéria orgânica, com o conteúdo de água na CC, no PMP e a água disponível (AD) às plantas.

Na década de 1960, vários trabalhos de pesquisa enfocaram a estimativa da CC, do PMP e da AD (SALTER e WILLIAMS, 1965 apud COSTA, 2012, p.39). Eles apontaram as relações entre as classes texturais e água disponível, as quais são atualmente conhecidas como FPTs classificatórias.

Já na década de 1970 foram realizadas pesquisas mais abrangentes usando grandes bancos de dados. Em um estudo desenvolvido por Hall et al. (1977 apud COSTA, 2012, p.40), utilizando solos da Inglaterra e País de Gales, os autores estabeleceram a CC, o PMP, a AD e a capacidade de aeração em função das classes texturais do solo e, também, derivaram funções contínuas para estimar essas propriedades do solo. No Brasil, ainda nos dias atuais, a maior limitação ao desenvolvimento de modelos de estimativa das propriedades hidráulicas do solo é a não existência de banco de dados com informações de características físico-hídricas dos solos de diferentes regiões.

O termo pedofunção foi introduzido formalmente por Lamp e Kneib (1981), enquanto que, Bouma e van Lanen (1986) usaram o termo função de transferência. Para evitar confusão com a terminologia função de transferência usada na física do solo e em muitas outras disciplinas com outros significados, Bouma (1989) denominou posteriormente essas equações como funções de pedotransferência.

No Brasil, os trabalhos pioneiros sobre FPTs surgiram na década de 80, relacionando a textura com a umidade do solo, por Arruda et al. (1987). Dados de relatório de levantamento de solo em várias localidades do Brasil, foram utilizados por Tomasella et al. (2000), tendo como variáveis preditoras a textura, carbono orgânico, umidade equivalente ao potencial de -33kPa e densidade do solo para estimar os parâmetros empíricos de capacidade de retenção de água no solo afim de obter funções de pedotransferência e comparar com o modelo de van Genuchten. Já em Pernambuco Oliveira et al. (2002), desenvolveu FPT para estimar a umidade do solo na CC e no PMP, neste mesmo ano Giarola et al. (2002), através de regressões múltiplas produziram FPT para solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, que relacionam

textura e os teores de óxidos de Fe e Al, com a umidade volumétrica na CC e no PMP. Recentemente Reichert et al. (2009) produziram FPT para estimar a umidade volumétrica do solo em potenciais específicos.

O uso mais frequente no Brasil de PTF é relacionado à estimativa de CC e PMP para sistema de irrigação (GEVAERD e FREITAS, 2006). Novas FPTs para retenção de água foram propostas por Urach (2007), que utilizou um banco de dados do Sistema Irriga e também de trabalhos anteriormente publicados, ambos realizados com solos do Estado do Rio Grande do Sul.

Recentemente, Michelon et al. (2010) desenvolveram FPTs para estimar a retenção de água em solos do Estado do Rio Grande do Sul utilizando um banco de dados composto por amostras coletadas na camada superficial de solos irrigados por aspersão, nas regiões do planalto, missões e fronteira oeste desse Estado.

Mesmo que a maioria das FPTs tenham sido desenvolvidas em países sob clima temperado, o desenvolvimento das equações adaptadas para condição de solos tropicais possibilitou estimar os parâmetros da equação de Van Genuchten (1980) com uma precisão muito melhor do que com o uso de equações desenvolvidas para outros solos (URACH, 2007).

Assad et al. (2001) avaliaram a disponibilidade de água utilizando principalmente solos dos Estados de Minas Gerais e São Paulo e propuseram uma função de pedotransferência (FPT) para estimar o conteúdo de água disponível baseada numa relação cúbica com os teores de areia do solo, entretanto, concluíram que a capacidade preditiva desta FPT foi pequena.

2.6.1 Funções de Pedotransferência

A Função de pedotransferência tem 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, a FPT estima atributos do solo de difícil determinação através de outros determinados rotineiramente (MEDEIROS, 2012).

As FPTs surgiram no estágio inicial do desenvolvimento da ciência quantitativa do solo, numa tentativa de estimar características do solo a partir de outras, o que se

tornou mais claro a partir da inter-relação características e processos (SHEIN; ARKHANGEL'SKAYA, 2006).

Várias têm sido as propostas de metodologias indiretas, para obtenção de capacidade de retenção de água no solo em diferentes potenciais matriciais, uma vez que essa propriedade é relativamente difícil de ser avaliada e algumas equações podem fornecer um ajuste para se obter esse parâmetro. Deste modo, Funções de Pedotransferência são equações de regressão ou modelos que relacionam propriedades básicas do solo entre si, e que são de importância para produção agrícola.

Embora grande parte das Funções de Pedotransferência tenha sido gerada para estimar propriedades hidráulicas do solo, há FPTs para avaliar outros atributos, como densidade do solo (BENITTES et al., 2006). Estudos apontam que medições diretas dessa propriedade através de amostras de campo, especialmente em profundidade, são trabalhosas e geralmente impraticáveis, por isso a predição da D_s através da FPT revela-se uma alternativa relevante para estimar esse atributo quando não está disponível por meios convencionais de análises, usando o procedimento de regressão múltipla com inclusões progressivas de variáveis (“forward stepwise”) (JEUNE, 2012).

A utilização da densidade do solo como preditor nas FPTs tem um efeito predominante na estimativa do teor de água próximo à saturação mostrando-se importante para os valores iniciais do teor de água (BARROS, 2010).

Os modelos que predizem densidade do solo a partir do teor de argila e do carbono orgânico são considerados FPT eficientes. Isto, porque usa dados existentes em relatórios de levantamentos para predizer uma variável perdida, que não foi determinada (BUDIMAN et al., 2003).

Fidalski e Tormena (2007) obtiveram FTP para a determinação das curvas de retenção de água a partir da D_s , carbono orgânico, com valor de R^2 de 0,94. No caso de Marcolin (2009), verificou que para a CC a função de estimativa pode ser obtida a partir dos teores de argila e valores de D_s , apresentando um valor de R^2 de 0,69; e para o PMP foram empregados os valores do conteúdo de matéria orgânica, teores de argila, silte e D_s , sendo obtido um valor R^2 de 0,937. Ambas as funções estabelecidas foram significativas a 0,01%. FPT baseadas em atributos do solo de fácil obtenção, utilizando regressões múltiplas lineares foram ajustadas por Tomasella e Hodnett (1998) para estimar D_s a partir do conteúdo de areia, silte e argila.

Conforme Oliveira et al. (2002) as funções de pedotransferência tendem a apresentar resultados mais precisos quanto mais homogêneos forem os solos que

compõem a base de dados e quanto mais próximos destes estiverem os solos que terão seus dados estimados. Assim, recomenda-se agrupar os solos em categorias uniformes de textura de modo a reduzir o coeficiente de variação, seguido na mesma proporção de cada uma das variáveis dependentes, a partir do conteúdo de água no solo nos potenciais de -10, -33, -1.500kPa (NASCIMENTO et al., 2010), homogeneizando assim o banco de dados. Com esse artifício, pode-se então obter melhorias consideráveis nas FPTs após agrupar solos em categorias uniformes da classe textural e relacionar com a capacidade preditiva de Pedofunções para a retenção de umidade (OLIVEIRA et al., 2002).

Rawls et al. (2003) estimaram a retenção de água nos potenciais de -33kPa e -1.500kPa e encontraram que a adição do teor de carbono nas FPTs que utilizam apenas a textura do solo causou melhoria significativa na estimativa da retenção de água para os potenciais estudados.

Embora a maioria da FPTs tenha sido desenvolvida para prever certas propriedades hidráulicas do solo, outras propriedades também podem ser estimadas, por exemplo, diferentes abordagens têm sido utilizadas para o desenvolvimento de FPTs, conforme Kay et al. (2002 apud COSTA, 2012, p.37) que utilizaram as FPTs visando prever a sensibilidade e impactos nas propriedades estruturais do solo com as mudanças no conteúdo de carbono orgânico.

Conforme Budiman et al. (2003) há necessidade de se definir dois princípios básicos de FPTs, evitando assim, o mau uso do conceito pedotransferência: (1) eficiência e (2) incerteza. O primeiro princípio das FPT é não prognosticar algo que é mais fácil e mais barato medir ou determinar. Como o objetivo de funções de pedotransferência é prever propriedades cujas medidas ou determinações diretas são difíceis, laboriosas ou muito caras, os preditores devem ser de obtenção mais fácil ou mais barata. O custo e o esforço para obter a informação sobre o preditor deverá ser menor do que o de obter a informação sobre o que se pretende prever. O segundo princípio implica em dois subprincípios, a incerteza das FPTs deve ser quantificada e se um conjunto de FPTs alternativas está disponível, deve-se usar aquela com menor variância.

As principais FPTs desenvolvidas para solos brasileiros são apresentadas na Tabela 2, com dados de resultados e variáveis predictoras, os atributos do solo como variáveis independentes são textura, densidade e carbono orgânico do solo segundo Medeiros (2012).

Tabela 2 - Funções de Pedotransferência desenvolvidas para solos no Brasil

Fonte	Resultados	Variáveis Predictoras	Local
Arruda et. al. (1987)	θ_{-33} kPa, θ_{-1500} 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)	θ_{-10} kPa, θ_{-1500} kPa	Textura	Rio Grande do Sul e Santa Catarina
Oliveira et al. (2002)	θ_{-33} kPa, θ_{-1500} kPa	Textura e densidade do solo	Pernambuco
Reichert et. al. (2009)	θ_{-6} kPa, θ_{-10} kPa, θ_{-33} kPa θ_{-100} kPa, θ_{-500} kPa, θ_{-1500} kPa θ_{-10} kPa, θ_{-33} kPa, θ_{-1500} kPa	Textura, matéria orgânica e densidade do solo e de partícula	Rio Grande do Sul
Barros (2010)	Parâmetros empíricos do modelo de Van Genuchten	Textura, densidade do solo, carbono orgânico	Solos do Nordeste Brasileiro

Fonte: Medeiros (2012).

Nas últimas décadas, muitas FPTs têm sido geradas por pesquisadores de vários países, usando diferentes metodologias, diversos grupos de dados e variáveis de entrada; porém ainda não existe um método que permita adequar o modelo de pedotransferência a diferentes regiões. Os trabalhos de FPTs são mais difundidos em solos de regiões de clima temperado, os quais apresentam diferenças significativas em relação aos solos tropicais (JEUNE, 2012).

A maior parte dessas equações de FPT é baseada em regressões estatísticas, utilizando a análise de regressão múltipla, mas novos métodos de predição estão sendo apresentados com base em outras avaliações (BUDIMAN et al., 2003).

2.6.2 Tipos de Funções de Pedotransferência

Costa (2012) menciona que as FPT podem ser classificadas em quatro tipos para estimar propriedades hidráulicas: a) tipo 1 - FPT de classe: predizem certas propriedades do solo com referência à classe do solo, ou seja, é uma predição de propriedades hidráulicas baseadas no modelo da estrutura do solo, como por exemplo os modelos apresentados por Arya e Paris (1981), onde a retenção de água foi estimada a partir da sua relação com a forma e o tamanho dos poros do solo. b) tipo 2 - FPT contínua: predizem certas propriedades do solo como uma função contínua das variáveis

medidas. c) tipo 3 – FPT pontuais: são estimados pontos específicos aplicados nas tensões de interesse para retenção de água no solo. d) tipo 4 – FPT paramétricas: são predições de parâmetros usados para descrever as propriedades hidráulicas do solo onde suas relações funcionais transformam propriedades disponíveis (textura, densidade do solo, carbono orgânico, etc.) em propriedades não disponíveis (retenção de água no solo).

Segundo Medeiros (2012) as FPTs classificadas como paramétricas são aquelas que estimam os parâmetros empíricos da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), e as classificadas como pontuais são as que estimam o conteúdo de água em diferentes potenciais da água no solo.

Medeiros et al. (2014) privilegiam as FPT paramétricas para alimentar os modelos matemáticos que descrevem o movimento da água e dos solutos no solo e as interações solo-planta-atmosfera.

Um caso especial de FPTs classificatória é definido como pedotransferências regradas. As regras incluem várias condições (se e não) para estratificar os tipos de solos e as informações disponíveis, até chegar a uma predição (COSTA, 2012).

Apesar da facilidade computacional para a determinação de FPT, estas não devem ser desenvolvidas de forma indiscriminada, e quanto à utilização da análise de regressão, quatro cuidados básicos devem ser tomados, conforme destaca Ribeiro Jr. (2001): (a) as relações entre as variáveis devem ser lineares; (b) evitar um número insuficiente de casos em relação ao número de variáveis consideradas, sendo recomendado que tal relação seja de pelo menos dez vezes mais casos que variáveis; (c) evitar variáveis independentes redundantes, isto é, que tenham um alto coeficiente de correlação entre si; (d) verificar a presença de valores anômalos através da análise dos resíduos.

As regressões estatísticas aplicadas para modelar relações entre duas ou mais variáveis tem três objetivos: 1) especificar um modelo de regressão; 2) estimar um determinado parâmetro; 3) estimar a variável dependente a partir de valores de variáveis independentes. O passo mais importante na elaboração de uma FPT é a escolha das variáveis independentes, ou variáveis preditoras, estas escolhas exigem um entendimento de quais variáveis independentes podem atuar de forma mais profunda na variável dependente, ou variável estimada. Devem-se retirar da análise as variáveis que possuem alta correlação entre si. E as técnicas mais aplicadas para selecionar variáveis

preditoras são: *stepwise*, *backward elimination*, *forward selection* e *stagewise* (MEDEIROS, 2012).

2.6.3 Métodos para estimar a retenção de água no solo utilizando Funções de Pedotransferência

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

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

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

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

2.6.4 Regressões lineares múltiplas

A Regressão Linear Múltipla foi introduzida por Sternberg et al. (1960). Esta técnica busca estabelecer uma relação linear entre as variáveis preditoras e preditas aplicando o método dos mínimos quadrados (SOARES, 2013). O método mais comumente usado nas FPTs de estimativas pontuais são as regressões lineares múltiplas, como no modelo apresentado na equação 3:

$$\theta_p = c_1 \text{ areia} + c_2 \text{ silte} + c_3 \text{ argila} + c_4 \text{ matéria orgânica} + c_5 \text{ densidade do solo} \quad (3)$$

Onde: θ_p é o conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) para a sucção p e c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 são os coeficientes da regressão.

As regressões lineares múltiplas são também usadas nas FPTs paramétricas. Os parâmetros dos modelos hidráulicos são primeiramente estimados pelo ajustamento dos dados aos modelos de retenção de água, para então serem elaboradas as relações empíricas entre as propriedades básicas do solo e os parâmetros (COSTA, 2012).

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

O método *backward elimination* inicia com a construção de um modelo de regressão com todas as variáveis disponíveis, e subsequentemente, variáveis são retiradas e o efeito dessa eliminação é avaliado da mesma forma que no método *forward selection*, as variáveis com valores de F menores que F-crítico são descartadas do modelo segundo Soares (2013).

2.6.5 Desempenho das Funções de Pedotransferência

A validação é um conceito controverso, pois é geralmente aceito e interpretado em termos de adequação de um propósito particular, que significa que o modelo é válido e responde de acordo com a expectativa dos processos modelados apenas na situação em que foi testado. O principal objetivo do desenvolvimento de FPTs é a possibilidade de prever as propriedades do solo que são de difícil medição. O quão bem as FPTs preveem certas propriedades do solo pode ser avaliado pela comparação

entre dados observados/medidos com os dados preditos. A previsibilidade das FPTs é usualmente avaliada sobre um conjunto de dados não usados na geração da FPTs (usualmente chamados de conjunto de validação) (COSTA, 2012).

Existem duas medidas estatísticas usadas para avaliar o desempenho ou previsibilidade das FPTs, conhecidos como “qualidade do ajuste”, fundamentadas no índice estatístico entre valores observados e estimados: a primeira inclui o erro máximo (EM), erro absoluto médio (EAM), o coeficiente de massa residual (CMR), a raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado (RMSE) e o índice de concordância de Willmott (1982). E a outra é baseada na covariância estabelecida pelo coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (R²) segundo Imam-bamber (1999, apud COSTA, 2012, p.55). As equações referentes a estes índices estão apresentadas a seguir:

Erro máximo:

$$EM = MAX (| O_i - P_i |) \quad (4)$$

Onde:

P_i = valores da umidade do solo, determinados em laboratório;

O_i = valores da umidade do solo estimados

Erro absoluto médio:

$$EAM = \left[\sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \right] \quad (5)$$

Onde:

n = número de amostras;

Coefficiente de massa residual:

$$CMR = \left[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right] / \sum_{i=1}^n O_i \quad (6)$$

Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (7)$$

Índice de concordância:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - P| + |O_i - O|)^2} \quad (8)$$

Onde:

P = valor médio, para a umidade do solo determinada em laboratório;

O = valor médio, para a umidade do solo estimada.

O valor de R^2 é geralmente interpretado como a proporção da variância explicada pelo modelo e resulta em valores entre zero (pior ajuste) e um (ajuste perfeito), o qual é facilmente interpretável. Mas esta medida somente avalia a relação linear entre variáveis, sendo insensível a diferenças proporcionais e aditivas. Por exemplo, se o valor predito (\hat{y}) tem uma relação linear com os dados observados (y : $\hat{y} = c_1y + c_2$), o R^2 será igual a um, independente do valor de c_1 e c_2 (variáveis múltiplas) segundo Costa (2012).

Nas FPTs o coeficiente de desempenho (c) é o produto de r e d ($c = r.d$) que é classificado conforme Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 3). Esta avaliação de desempenho tem por base indicadores estatísticos, de precisão, dada pelo coeficiente de correlação (r), indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, de exatidão (d), que está associado ao desvio entre valores estimados e medidos, dado pelo índice de concordância de Willmott.

Tabela 3 - Classificação dos índices de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997).

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

Fonte: Barbosa (2011)

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na área pertencente à Usina Santa Teresa localizada no município de Goiana, PE (7°36'56,3"S 34°59'19,1"W), em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) irrigada, com as seguintes variedades RB 92579, RB 867515, RB 961542, RB 931011 e RB 813804. Segundo Silva et al. (2010), no município de Goiana/PE, o período de abril a julho é considerado a quadra mais chuvosa, pois concentra cerca de 60% do total pluviométrico anual (2.000 mm). As temperaturas máximas mais elevadas ocorrem no período de dezembro a março, com valores superiores a 30°C e temperaturas médias mensais oscilando entre 23,6 e 25,6°C sendo as mínimas entre 19,1 e 21,2°C. Portanto, verifica-se que apesar de o município de Goiana estar situado numa região onde a presença de chuva não é escassa, há a necessidade de irrigação em virtude da distribuição irregular da mesma.

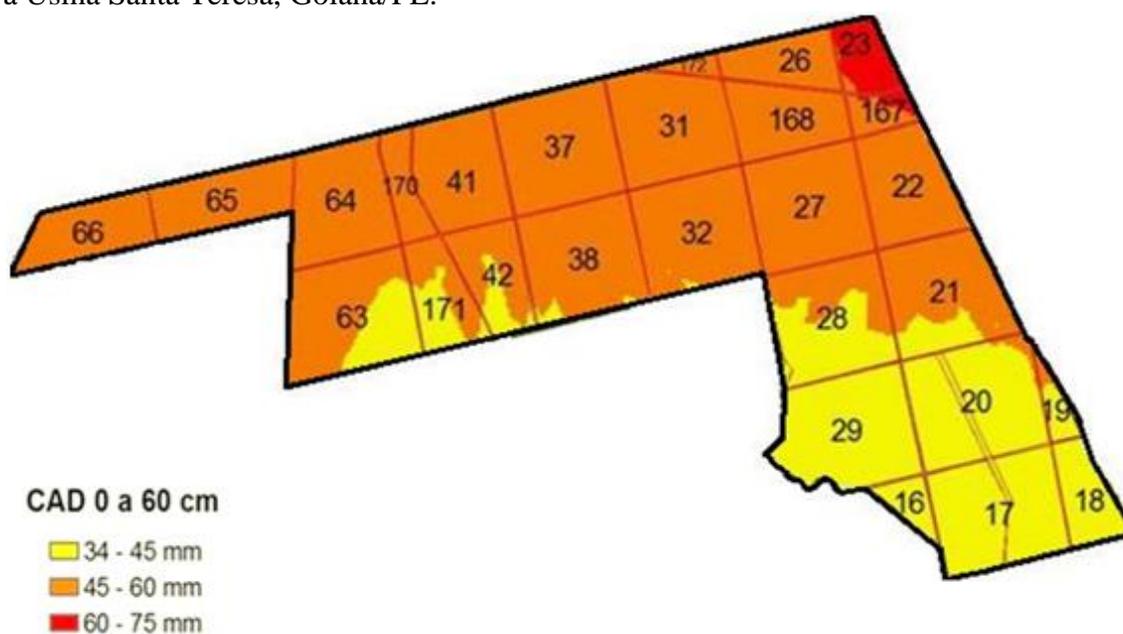
A área é irrigada por sistema de irrigação de Linha Lateral Móvel que é na sua essência um sistema de irrigação por aspersão automatizada que permite mobilidade de todo o equipamento sobre uma área retangular que se deseja irrigar e se desloca perpendicularmente a fonte fornecedora de água.

O experimento localizou-se no Engenho Bujari da Usina onde, foi selecionada uma área composta por 12 lotes, os quais possuem um total de 269,02 ha, devidamente identificados e georreferenciados.

Para o desenvolvimento das Funções de Pedotransferência (FPT) foram utilizadas 99 amostras de solo (não deformadas) coletadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, em pontos georreferenciados com uso do GPS, modelo ETREX da Garmin (Apêndice B). A Figura 5 apresenta os lotes cultivados com cana-de-açúcar irrigada no Engenho Bujari, entre os quais estão os lotes amostrados para este estudo (31; 37; 38; 41; 42; 63; 64; 65; 66; 167; 170; 171). A umidade do solo equivalente à capacidade de campo foi determinada em duas tensões em virtude da classe textural de cada amostra, sendo -10kPa para solos com textura arenosa e -33kPa para solos com textura argilosa. Para tanto, as amostras de solo foram agrupadas em função da similaridade da classe textural para cada camada estudada.

Além disso, foi utilizado um banco de dados contendo os atributos físico-hídricos dos solos estudados obtidos com amostras de solo não estruturadas. O levantamento taxonômico realizado pela Usina classificou o solo apenas em primeira ordem como Argissolo.

Figura 5 – Lotes cultivados com cana-de-açúcar irrigada no Engenho Bujari pertencente à Usina Santa Teresa, Goiana/PE.



Fonte: Usina Santa Teresa, Goiana, PE (2013).

A Tabela 4 mostra o tamanho da área de cada lote estudado e o número de pontos amostrados. Os critérios para o número de amostras por lote foram referentes ao tamanho de cada lote, na qual sua divisão determinava a quantidade de pontos a serem amostrados.

Tabela 4 – Números dos lotes, área e número de pontos amostrados no campo experimental

Número do Lote	Área (ha)	Número de Pontos Amostrados
31	30,12	4
37	32,58	4
38	32,45	4
41	23,72	2
42	16,52	2
63	35,5	4
64	27,31	4
65	20,92	2
66	20,57	2
167	5,76	1
170	8,15	2
171	15,42	2
Total	12	269,02
		33

Amostras não deformadas foram coletadas em anéis volumétricos de aproximadamente 100 cm³ (5 cm de diâmetro e 5 cm de altura). Os anéis foram introduzidos verticalmente no solo, utilizando um amostrador tipo Uhland modificado, identificados de acordo com sua posição e profundidade, e acondicionados de modo a conservar a estrutura do solo. Já para as amostras deformadas utilizou-se um trado holandês para coletar amostras de solo com aproximadamente 500 g de cada camada definida para este estudo (Apêndice B).

As amostras não deformadas foram utilizadas para determinação de umidade do solo na câmara de Richards sob tensões de -10kPa para solos arenosos e de -33kPa para solos argilosos, equivalente à capacidade de campo e de -1500 kPa, referente ao ponto de murcha permanente, bem como a densidade do solo, com base na relação entre a massa do solo seco em estufa a 105°C e o volume do anel, segundo Embrapa (2011). As amostras de solo deformadas foram utilizadas para a análise granulométrica através do método do hidrômetro de Bouyoucos, conforme recomendação da Embrapa (2011), com peneiramento da fração areia em malha de 53µm e leitura do silte + argila em 24h, segundo Almeida (2008). O carbono orgânico do solo foi obtido pelo método de Walkley-Black, que utiliza o dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇⁻²) em meio ácido como agente oxidante, conforme Mendonça e Matos (2005).

As FPTs foram geradas por meio de cinco variáveis independentes candidatas ao modelo: teores de areia, silte e argila, densidade do solo e teor de carbono orgânico e, duas variáveis dependentes: umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}).

Os resultados foram submetidos à regressão linear múltipla pelo programa SAEG (Sistemas para Análises Estatísticas), através do método *stepwise* onde foi selecionada a melhor função pelo processo de *backward elimination*, para gerar a FPT que melhor prediz a θ_{cc} e a θ_{pmp} . Neste procedimento, ocorre a remoção sequencial das variáveis por ordem decrescente de importância, encontrando os modelos finais significativos que caracterizam as Funções de Pedotranferência. Em situações que não foi encontrado um modelo significativo, foi utilizado o artifício de eliminar os pontos identificados como *outlier*, ou seja, observações que apresentam um grande afastamento das demais ou que sejam inconsistentes. A detecção destes pontos foi feita por meio de análise gráfica da dispersão, apenas para as variáveis que apresentaram elevado valor do coeficiente de variação. Esse tratamento foi adotado em virtude deste comportamento

ser atribuído a erros de medição, execução e a própria variabilidade inerente dos elementos da população.

Medidas estatísticas foram usadas para avaliar o desempenho ou previsibilidade das FPTs, fundamentadas nos índices estatísticos entre valores observados e estimados. O desempenho das FPT geradas nesta pesquisa foi verificado com base em indicadores estatísticos, de precisão, dada pelo coeficiente de correlação (r), indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, e de exatidão (d), que está associado ao desvio entre valores estimados e medidos, dado pelo índice de concordância de Willmott (1982). O coeficiente de desempenho (c) é o produto de r e d ($c = r.d$) que é classificado conforme Camargo e Sentelhas (1997) quanto à qualidade de ajuste. A estatística descritiva foi utilizada para gerar os resultados de média, valor máximo e mínimo, assimetria, curtose, desvio-padrão, erro-padrão-da-média e coeficiente de variação e foram correlacionados com a θ_{cc} , θ_{pmp} nas profundidades e devidas tensões aplicadas buscando as variáveis significativas que possam ser utilizadas na predição da umidade através das Funções de Pedotransferência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de estatística descritiva equivalente à tensão de -10kPa na camada de 0-20cm, observa-se na Tabela 5, que o carbono orgânico teve o maior teor dentre as camadas analisadas variando de 1,17 a 2,41 g kg⁻¹, e a medida que aumenta a profundidade esse teor decresce, conforme tabelas 5 e 6. O solo desta camada teve maior predominância da fração areia sendo o valor médio de 849,52 g kg⁻¹, variando de 704,69 a 935,60 g kg⁻¹, seguido da fração argila, com média de 83,06 g kg⁻¹ e variação de 45,08 a 156,43 g kg e do silte teve uma média de 67,42 g kg⁻¹ e amplitude de 19,32 a 85,40 g kg⁻¹.

Os valores de densidade do solo variaram de 1,40 a 1,56 Mg m⁻³, e, dentre as variáveis analisadas, nesta camada, foi a que apresentou o mais baixo coeficiente de variação (CV=3,85%). Neste grupo de amostras de solo, a classe textural média na camada de 0-20cm do solo estudado foi classificada como areia-franca.

Tabela 5 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 0-20cm e tensão de -10kPa

Variável	Umidade -10kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	(cm ³ cm ⁻³)	Mg m ⁻³		g kg ⁻¹		
Nº válidos	8	8	8	8	8	8
Média	0,300	1,480	1,828	849,52	83,06	67,42
Máximo	0,351	1,568	2,417	935,60	156,43	85,40
Mínimo	0,250	1,404	1,177	704,69	45,08	19,32
Assimetria	-0,166	-0,036	-0,252	-0,392	0,632	0,606
Curtose	1,333	1,446	1,210	1,568	1,589	1,636
DP ²	0,035	0,057	0,474	8,355	4,326	2,439
EPM ³	0,012	0,020	0,167	2,954	1,529	0,862
CV(%) ⁴	11,888	3,858	25,967	9,835	52,093	55,958

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Na camada de 20-40cm, a densidade do solo teve menor coeficiente de variação (CV = 3,53 %), dentre as camadas estudadas, com valores variando de 1,40 a 1,54 Mg m⁻³ e o silte, com maior coeficiente de variação (78,83%), evento também mencionado por Nascimento et al. (2010), pois como o silte é determinado a partir de outras duas variáveis, é comum que seu CV seja maior. Os teores de silte nesta camada variaram de 13,6 a 159,67 g kg⁻¹, com distribuição assimétrica positiva. Neste grupo de amostras de solo, a classe textural média na camada de 20-40cm foi classificada como areia-franca (Tabela 6).

Tabela 6 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 20-40cm e tensão de -10kPa

Variável	Umidade -10kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	(cm ³ cm ⁻³)	Mg m ⁻³		g kg ⁻¹		
Nº válidos	7	7	7	7	7	7
Média	0,300	1,457	1,340	852,65	84,11	63,24
Máximo	0,326	1,541	1,994	937,40	170,80	159,67
Mínimo	0,265	1,403	1,009	779,30	49,00	13,60
Assimetria	-0,328	0,451	0,599	-0,066	0,949	1,242
Curtose	1,553	1,479	1,620	1,464	2,317	3,156
DP ²	0,021	0,051	0,374	5,728	4,388	4,680
EPM ³	0,007	0,019	0,141	2,164	1,658	1,769
CV(%) ⁴	7,030	3,534	27,909	6,717	52,184	78,831

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Por outro lado, o maior conteúdo de água retida no potencial de -10kPa foi encontrado na camada de 40-60cm (Tabela 7), comparando com as demais camadas, e os valores estão na faixa de 0,27 a 0,46 cm³ cm⁻³. Essa maior disponibilidade de água nas camadas subsuperficiais dos solos arenosos pode estar relacionada principalmente com os teores de areia fina desses solos. O aumento da disponibilidade de água com a redução de tamanho das partículas da areia também foi constatado por Albuquerque et al. (2011), e a medida que a profundidade aumenta ocorre um aumento da disponibilidade de água devido o decréscimo da taxa de evapotranspiração. A classe textural média, neste grupo de amostras de solo da camada de 40-60cm, foi classificada como areia.

Tabela 7 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 40-60cm e tensão de -10kPa

Variável	Umidade - 10kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	(cm ³ cm ⁻³)	Mg m ⁻³		g kg ⁻¹		
Nº válidos	6	6	6	6	6	6
Média	0,347	1,408	0,631	897,15	67,28	35,57
Máximo	0,469	1,484	0,921	932,40	120,80	57,20
Mínimo	0,279	1,297	0,106	825,60	40,80	15,40
Assimetria	0,674	-0,428	-0,858	-0,590	0,724	0,258
Curtose	1,649	1,449	2,237	1,291	1,679	1,162
DP ²	0,071	0,068	0,281	4,532	3,086	1,634
EPM ³	0,029	0,028	0,114	1,850	1,260	0,667
CV(%) ⁴	20,474	4,882	44,530	5,051	45,876	45,950

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Analisando os valores obtidos na camada de 0-20cm para o potencial -10kPa, o método “stepwise backward elimination” excluiu a variável carbono orgânico (CO), pois apresentou baixo coeficiente de correlação (-0,062) com a variável resposta mostrado na matriz de correlação (Tabela 8). A forte correlação do carbono orgânico

com a densidade do solo D_s (-0,675) evidencia a contribuição da D_s no modelo e que ela pode representar o CO para explicar parte da sua variância predita do modelo.

A forte correlação das outras variáveis com a resposta gerou um modelo de elevado grau de ajuste $R^2 = 0,99$ e altamente significativo (0,0002), observado na estatística apresentada pelo teste “t”, para os coeficientes de regressão, e pela estatística do teste F.

Tabela 8 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas na camada de 0-20cm e tensão de -10kPa

Variável	Umidade CC -10kPa	$D_s^{(1)}$	Carbono	Areia	Argila	Silte
CC -10kPa	1					
Ds	-0,333	1				
Carbono	-0,062	-0,675	1			
Areia	0,479	-0,122	0,236	1		
Argila	-0,949	0,141	0,300	-0,514	1	
Silte	-0,590	-0,306	0,070	-0,578	0,553	1

¹Densidade do solo.

A equação para predição do conteúdo de água ($m^3 m^{-3}$) retido no potencial -10kPa na camada de 0-20cm do Argissolo é apresentada na Equação (9):

$$\theta_{-10kPa (0-20cm)} = 0,776581 - 0,650917 \cdot 10^{-2} \cdot ARG - 0,542505 \cdot 10^{-2} \cdot SILT - 0,786475 \cdot 10^{-3} \cdot ARE - 0,223935 \cdot Ds \quad (9)$$

Na camada seguinte (20-40cm) para o mesmo potencial (-10kPa), a matriz de correlações do modelo mostra a fraca correlação do CO (0,203) com a variável resposta (Tabela 9), razão pela qual o “stepwise backward elimination” excluiu-a. Forte correlação do CO com a argila (0,58848) foi encontrada o que evidencia que a contribuição da argila no modelo pode representar o CO.

A forte correlação entre as demais variáveis favorece a geração de um modelo de elevado grau de ajuste $R^2 = 0,99$ e altamente significativo (0,0043) apresentada pelo teste “t”, e pela estatística do teste F.

Tabela 9 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 20-40cm e tensão de -10kPa

Variável	Umidade CC -10kPa	$D_s^{(1)}$	Carbono	Areia	Argila	Silte
CC -10kPa	1					
Ds	-0,961	1				
Carbono	0,203	-0,167	1			
Areia	0,599	-0,518	-0,019	1		
Argila	-0,654	0,633	0,588	-0,579	1	
Silte	-0,112	0,087	-0,444	-0,680	-0,178	1

¹Densidade do solo.

A Função de Pedotransferência gerada para estimar a umidade volumétrica retida no potencial de -10kPa na camada de 20-40cm é descrita na Equação (10):

$$\theta_{-10\text{kPa}}(20-40\text{cm}) = 0,311937 - 0,379470 * D_s + 0,525233 * 10^{-2} * \text{SILT} + 0,550794 * 10^{-2} * \text{ARE} + 0,483226 * 10^{-2} * \text{ARG} \quad (10)$$

Os valores apresentados na Tabela 10, mostram a matriz de correlações no potencial de -10kPa na camada de 40-60cm, onde o “stepwise backward elimination” excluiu as variáveis silte e areia do modelo pois, essas variáveis apresentaram baixo coeficiente de correlação de 0,153 para o silte e -0,159 para areia com a variável resposta. Entretanto, uma forte correlação entre as variáveis independentes com a variável resposta favoreceu a geração de um modelo de elevado grau de ajuste $R^2 = 0,97$ e altamente significativo, observado pela significância da estatística no teste “t” para os coeficientes de regressão, e através do teste F.

Tabela 10 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 40-60cm e tensão de -10kPa

Variável	Umidade CC -10kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
CC -10kPa	1					
Ds	-0,488	1				
Carbono	-0,697	0,241	1			
Areia	-0,159	0,012	-0,263	1		
Argila	0,373	-0,960	-0,334	0,159	1	
Silte	0,153	-0,012	0,013	-0,923	-0,070	1

¹Densidade do solo.

A FPT gerada para estimar a umidade volumétrica no solo estudado sob potencial de -10kPa, na camada de 40-60cm para é expressa na Equação (11):

$$\theta_{-10\text{kPa}}(40-60\text{cm}) = 0,462730 * 10^1 - 0,222132 * \text{CO} - 0,267436 * 10^1 * D_s - 0,553844 * 10^{-1} * \text{ARG} \quad (11)$$

A variável preditora que teve maior frequência de eliminação foi o carbono orgânico nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60cm e potencial de -10kPa por causa das baixas correlações observadas nos valores desta variável. Mello et al. (2002) constataram comportamento semelhante e verificaram que as propriedades do solo mais significativas foram os percentuais de argila e areia e, a densidade do solo para efeito de umidade do solo. Portanto, a variável carbono para gerar FPT nas respectivas camadas e tensão pode ser dispensada para ser analisada em laboratório e substituída pelas variáveis de densidade do solo e granulometria.

Observando a análise estatística descritiva equivalente à tensão de -33kPa nas três camadas estudadas, a contribuição de cada variável independente na previsão da

variável dependente, teve semelhança com a constatação de Nascimento et al. (2010) onde, as variáveis silte, argila e densidade explicam melhor as variações do conteúdo de água retida no solo na tensão de -33kPa. No solo estudado, a partir da tensão de -33kPa nas camadas entre 0-20, 20-40 e 40-60cm, é possível desenvolver equações preditivas do conteúdo de água no solo que pela natureza dos solos de Tabuleiros os teores na qual predominam é a fração argila.

Dentre as respectivas camadas analisadas ao potencial adotado a variável que apresentou o mais baixo coeficiente de variação foi a densidade do solo ($CV = 8,47\%$) na camada de 0-20cm (Tabela 11), com valores variando de 1,25 a 1,83 $Mg\ m^{-3}$. A classe textural média, neste grupo de amostras de solo da camada de 0-20cm, foi classificada como franco-argilo-arenosa.

Tabela 11 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 0-20cm e tensão de -33kPa

Variável	Umidade -33kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	($cm^3\ cm^{-3}$)	$Mg\ m^{-3}$		$g\ kg^{-1}$		
Nº válidos	25	25	25	25	25	25
Média	0,227	1,521	1,691	593,99	324,12	81,89
Máximo	0,295	1,832	2,192	750,60	433,01	216,91
Mínimo	0,145	1,256	1,320	395,85	205,80	21,85
Assimetria	-0,417	0,290	0,127	-0,109	-0,417	2,017
Curtose	2,552	2,879	1,891	2,332	1,903	7,948
DP ²	0,037	0,128	0,246	9,388	6,437	3,926
EPM ³	0,007	0,025	0,049	1,877	1,287	0,785
CV(%) ⁴	16,301	8,474	14,570	15,805	19,859	54,718

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Na Tabela 12 consta o maior conteúdo de água retida dentre as três camadas sob potencial de -33kPa, onde os valores variaram entre 0,177 e 0,395 $cm^3\ cm^{-3}$, com média de 0,293 $cm^3\ cm^{-3}$. Os valores de Ds variam de 1,30 a 1,82 $Mg\ m^{-3}$, tendo baixo coeficiente de variação (9,237%), já os valores de carbono, areia, argila e silte variaram de 0,70 a 1,80, de 448,48 a 750,60, de 205,80 a 454,00 e 26,80 a 145,64 $g\ kg^{-1}$, respectivamente, e seus coeficientes de variação foram: 23,47%, 12,85%, 19,85% e 43,89%. Todas as variáveis apresentam-se com distribuição assimétrica negativa, indicando que seus dados se concentram à esquerda da faixa de valores. Neste grupo de amostras de solo, a classe textural média na camada de 20-40cm foi classificada como argilo-arenosa.

Tabela 12 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 20-40cm e tensão de -33kPa

Variável	Umidade -33kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	(cm ³ cm ⁻³)	Mg m ⁻³	g kg ⁻¹			
Nº válidos	26	26	26	26	26	26
Média	0,293	1,521	1,272	559,33	356,91	83,76
Máximo	0,395	1,823	1,804	750,60	454,00	145,64
Mínimo	0,177	1,303	0,706	448,48	205,80	26,80
Assimetria	0,022	0,289	0,095	0,667	-0,484	0,571
Curtose	1,795	2,059	2,073	3,015	2,145	2,419
DP ²	0,064	0,140	0,298	7,192	7,087	3,198
EPM ³	0,012	0,027	0,058	1,410	1,389	0,627
CV(%) ⁴	22,155	9,237	23,478	12,859	19,857	43,893

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Analisando os dados obtidos das três profundidades a variável que apresentou o maior coeficiente de variação entre as variáveis foi o silte. Na camada de 40-60cm o CV foi de 65,68% e a amplitude dos valores foi de 10,72 a 187,02 g kg⁻¹ e distribuição assimétrica positiva. A classe textural média, neste grupo de amostras de solo da camada de 40-60cm, foi classificada como argilo-arenosa (Tabela 13).

Tabela 13 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 40-60cm e tensão de -33kPa

Variável	Umidade -33kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	(cm ³ cm ⁻³)	Mg m ⁻³	g kg ⁻¹			
Nº válidos	27	27	27	27	27	27
Média	0,271	1,516	0,897	515,94	411,52	72,54
Máximo	0,323	1,838	1,632	713,80	494,01	187,02
Mínimo	0,219	1,210	0,582	324,02	250,80	10,72
Assimetria	-0,059	0,229	1,023	0,376	-0,998	1,063
Curtose	1,796	2,038	4,838	2,729	2,730	3,409
DP ²	0,029	0,165	0,231	9,181	7,204	4,394
EPM ³	0,005	0,031	0,044	1,766	1,386	0,845
CV(%) ⁴	10,908	10,937	25,773	17,795	17,506	65,685

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Na matriz de correlação no potencial de -33kPa na camada de 0-20cm, o “stepwise backward elimination” excluiu as variáveis de carbono e areia, pois não apresentaram valores significativos com a variável resposta. A correlação entre as demais variáveis independentes e a variável resposta favoreceu a geração de um modelo com grau de ajuste baixo $R^2 = 0,48$, porém significativo (Tabela 14).

Tabela 14 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 0-20cm e tensão de -33kPa

Variável	Umidade CC -33kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
CC -33kPa	1					
Ds	-0,389	1				
Carbono	-0,380	0,168	1			
Areia	-0,543	0,169	0,293	1		
Argila	0,515	-0,062	-0,196	-0,732	1	
Silte	0,500	-0,183	-0,290	-0,623	0,299	1

¹ Densidade do solo.

A FPT gerada para estimar a umidade volumétrica no solo na camada de 0-20cm equilibrada no potencial de -33kPa é descrita na Equação (12):

$$\theta_{-33\text{kPa}(0-20\text{cm})} = 0,265097 + 0,230122 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ARG} - 0,879097 \cdot 10^{-1} \cdot \text{Ds} + 0,307323 \cdot 10^{-2} \cdot \text{SILT} \quad (12)$$

Na matriz de correlação analisada na camada seguinte (20-40cm) para o mesmo potencial, o método excluiu a variável areia que teve baixo coeficiente de correlação (-0,075) e Ds (0,103), pois não apresentou valores significativos com a variável resposta (Tabela 15). Observa-se ainda na matriz de correlação a geração de um modelo com $R^2 = 0,86$ e significativo analisado pela estatística do teste “t”, para os coeficientes de regressão, e pela estatística do teste F.

Tabela 15 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 20-40cm e tensão de -33kPa

Variável	Umidade CC -33kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
CC -33kPa	1					
Ds	-0,103	1				
Carbono	-0,101	0,270	1			
Areia	-0,075	-0,048	-0,054	1		
Argila	0,090	-0,159	-0,112	-0,805	1	
Silte	-0,895	0,101	-0,093	-0,102	0,113	1

¹ Densidade do solo.

A Equação 13 expressa a Função de Pedotransferência gerada para estimar a umidade volumétrica no Argissolo na camada de 20-40cm em um potencial de -33kPa.

$$\theta_{-33\text{kPa}(20-40\text{cm})} = 0,419708 - 0,189086 \cdot 10^{-1} \cdot \text{SILT} + 0,162118 \cdot 10^{-2} \cdot \text{ARG} - 0,366851 \cdot 10^{-1} \cdot \text{CO} \quad (13)$$

Na matriz de correlação analisada para o potencial de -33kPa na camada de 40-60cm, foram eliminadas as variáveis areia e argila, uma vez que estas variáveis apresentam baixo coeficiente de correlação 0,147 e -0,183, respectivamente, com a variável resposta (Tabela 16). Mesmo assim, a forte correlação das outras variáveis independentes com a variável resposta favoreceu a obtenção de um modelo com elevado

$R^2 = 0,98$ e altamente significativo, observado pela significância da estatística no teste “t” para os coeficientes de regressão, e através do teste F.

Tabela 16 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 40-60cm e tensão de -33kPa

Variável	Umidade CC -33kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
CC -33kPa	1					
Ds	-0,987	1				
Carbono	0,275	-0,330	1			
Areia	0,147	-0,176	0,519	1		
Argila	-0,183	0,239	-0,506	-0,818	1	
Silte	0,923	-0,906	0,441	0,345	-0,327	1

¹ Densidade do solo.

A Função de Pedotransferência que melhor estimou a umidade volumétrica na camada de 40-60cm equilibrada no potencial de -33kPa, para os dados analisados, é apresentada na Equação (14):

$$\theta_{-33\text{kPa}}(40-60\text{cm}) = 0,490159 - 0,143760 \cdot Ds + 0,159807 \cdot 10^{-2} \cdot \text{SILT} - 0,121196 \cdot 10^{-1} \cdot \text{CO} \quad (14)$$

A variável que teve maior frequência de eliminação foi a variável areia nas três camadas estudadas sob potencial de -33kPa, devido à baixa correlação com a variável resposta em questão, apresentando dados semelhantes aos de Michelin (2010). Assim, a areia poder ser dispensada para gerar FPT na tensão de -33kPa.

A estatística descritiva dos valores obtidos à tensão de -1.500kPa nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60cm, demonstra que a densidade do solo tem o menor coeficiente de variação (CV = 7,69%; 8,55% e 10,54% respectivamente) dentre as variáveis avaliadas em cada camada (Tabelas 17, 18 e 19), e que, seus valores variaram de 1,25 a 1,84 Mg m⁻³ em todo banco de dados. A classe textural média na camada de 0-20cm, considerando todas as 33 amostras de solo, foi classificada como franco-argilo-arenosa.

Tabela 17 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 0-20cm e tensão de -1.500kPa

Variável	Umidade (-1.500kPa) (cm ³ cm ⁻³)	Ds ⁽¹⁾ Mg m ⁻³	Carbono	Areia g kg ⁻¹	Argila	Silte
Nº válidos	33	33	33	33	33	33
Média	0,161	1,511	1,724	655,94	265,68	78,38
Máximo	0,243	1,832	2,417	935,60	433,01	216,91
Mínimo	0,101	1,256	1,177	395,85	45,08	19,32
Assimetria	0,313	0,485	0,182	0,382	-0,620	1,960
Curtose	1,728	3,493	2,137	2,288	1,977	8,526
DP ²	0,045	0,116	0,313	14,319	12,051	3,770
EPM ³	0,007	0,020	0,054	2,492	2,097	0,656
CV(%) ⁴	28,150	7,689	18,191	21,830	45,360	57,507

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Na camada de 20-40cm o conteúdo de água apresentou menor coeficiente de variação conforme apresentado na Tabela 18 (CV = 25,47%), comparando com as demais camadas estudadas e, os valores variaram entre 0,10 a 0,26 cm³ cm⁻³. A classe textural média na camada de 20-40cm, considerando todas as 33 amostras, foi classificada como franco-argilo-arenosa.

Tabela 18 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 20-40cm e tensão de -1.500kPa

Variável	Umidade (-1.500kPa)	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
	(cm ³ cm ⁻³)	Mg m ⁻³		g kg ⁻¹		
Nº válidos	33	33	33	33	33	33
Média	0,189	1,507	1,286	613,51	302,41	84,08
Máximo	0,266	1,823	1,994	937,40	468,14	169,01
Mínimo	0,106	1,303	0,706	448,48	49,00	13,60
Assimetria	-0,216	0,539	0,327	0,988	-0,698	0,740
Curtose	1,609	2,502	2,304	2,835	2,122	2,461
DP ²	0,048	0,128	0,311	13,336	13,375	4,146
EPM ³	0,008	0,022	0,054	2,321	2,328	0,721
CV(%) ⁴	25,476	8,551	24,172	21,737	44,228	54,769

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

Por outro lado, os maiores valores de coeficiente de variação entre as variáveis estudadas nas três camadas foram encontrados nos dados de silte e seus valores foram de 10,72 a 216,91 g kg⁻¹ (Tabelas 17 e 19), apresentando distribuição do tipo assimétrica positiva e leptocúrtica. Esta resposta indica o grau de desvio ou afastamento da simetria de uma distribuição de frequência, neste caso uma distribuição positiva, ou seja, existe uma concentração de valores mais positivos. A curtose é o grau de distribuição de frequências, a qual é considerada leptocúrtica quando a curtose é maior que a da distribuição normal. A classe textural média na camada de 40-60cm, considerando todas as 33 amostras coletadas nesta camada, foi classificada como franco-argilo-arenosa.

Tabela 19 - Estatística descritiva das propriedades utilizadas na elaboração das funções de pedotransferência da camada de 40-60cm e tensão de -1.500kPa

Variável	Umidade (-1.500kPa) (cm ³ cm ⁻³)	Ds ⁽¹⁾ Mg m ⁻³	Carbono	Areia g kg ⁻¹	Argila	Silte
Nº válidos	33	33	33	33	33	33
Média	0,193	1,497	0,889	585,24	348,93	65,83
Máximo	0,281	1,838	1,978	932,40	494,01	187,02
Mínimo	0,104	1,210	0,106	324,02	40,80	10,72
Assimetria	-0,002	0,458	1,055	0,866	-1,039	1,285
Curtose	1,840	2,324	6,167	2,527	2,559	4,092
DP ²	0,051	0,157	0,321	17,165	15,014	4,195
EPM ³	0,008	0,027	0,055	2,988	2,613	0,730
CV(%) ⁴	26,564	10,539	36,132	29,329	43,031	68,750

¹ Densidade do solo; ² Desvio-padrão; ³ Erro-padrão-da-média; ⁴ Coeficiente de variação.

A análise da matriz de correlação dos dados obtidos na tensão de -1.500kPa na camada de 0-20cm de profundidade, subsidiou o modelo a eliminar as variáveis Ds (-0,144) e areia (-0,103) por não apresentarem alta correlação com a variável resposta. A argila também teve baixo coeficiente, no entanto, devido ao efeito do backward elimination apenas as duas variáveis (Ds e areia) foram retiradas por apresentarem valores menores de teste “t” e teste “F” que o crítico, e a partir daí foi encontrando um efeito altamente significativo na equação ao gerar o modelo. A presença de forte correlação das outras variáveis com a resposta favoreceu a um modelo de elevado grau de ajuste R² = 0,97 e altamente significativo (Tabela 20).

Tabela 20 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 0-20cm e tensão de -1.500kPa

Variável	Umidade PMP -1.500kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
PMP -1.500kPa	1					
Ds	-0,144	1				
Carbono	0,984	-0,174	1			
Areia	-0,103	-0,035	-0,023	1		
Argila	0,009	0,112	-0,074	-0,891	1	
Silte	0,288	-0,130	0,205	-0,611	0,405	1

¹ Densidade do solo.

A Equação que melhor estimou a umidade volumétrica no solo na camada de 0-20cm e potencial de -1.500kPa nos dados analisados é apresentada na Equação (15):

$$\theta_{-1500\text{kPa}}(0-20\text{cm}) = -0,927846 \cdot 10^{-1} + 0,141254 \cdot \text{CO} + 0,807435 \cdot 10^{-3} \cdot \text{SILT} + 0,205202 \cdot 10^{-3} \cdot \text{ARG} \quad (15)$$

Na camada seguinte 20-40cm sob mesmo potencial de umidade -1.500kPa, o método “stepwise backward elimination” excluiu as variáveis Ds (0,077) e CO (0,126)

devido apresentarem baixo coeficiente de correlação com a variável resposta, cabe observar que entre as demais variáveis independentes e selecionadas para o modelo final teve a presença de uma forte correlação com a variável resposta que favoreceu a geração de um modelo altamente significativo $R^2 = 0,94$ (Tabela 21).

Tabela 21 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 20-40cm e tensão de -1.500kPa

Variável	Umidade PMP -1.500kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
PMP -1.500kPa	1					
Ds	0,077	1				
Carbono	0,126	0,187	1			
Areia	0,150	-0,190	0,112	1		
Argila	-0,168	0,114	-0,081	-0,887	1	
Silte	-0,964	-0,071	-0,167	-0,119	0,188	1

¹ Densidade do solo.

A Função de Pedotransferência gerada para estimar a umidade volumétrica do solo na camada de 20-40cm sob potencial de -1.500kPa é descrita na Equação (16):

$$\theta_{-1500kPa(20-40cm)} = 0,203229 - 0,114216*10^{-1}*SILT + 0,811299*10^{-3}*ARE + 0,775891*10^{-3}*ARG \quad (16)$$

Nos resultados da matriz de correlação obtidos sob tensão de -1.500kPa nas amostras da camada de 40-60cm, o método estatístico excluiu as variáveis CO (0,152) e areia (0,067) por não apresentarem valores significativos com a variável resposta. A argila e o silte tiveram baixo coeficiente também, porém, devido ao efeito do *backward elimination* apenas as duas variáveis CO e areia foram retiradas por apresentarem valores menores de teste “t” e teste “F” que o crítico. A forte correlação das demais variáveis independentes com a variável resposta gerou um modelo de elevado grau de ajuste com $R^2 = 0,96$ e altamente significativo pelo teste “t” e teste F (Tabela 22).

Tabela 22 - Matriz de correlação entre as variáveis estudadas da camada de 40-60cm e tensão de -1.500kPa

Variável	Umidade PMP -1.500kPa	Ds ⁽¹⁾	Carbono	Areia	Argila	Silte
PMP -1.500kPa	1					
Ds	-0,973	1				
Carbono	0,152	-0,163	1			
Areia	0,067	-0,127	0,077	1		
Argila	-0,061	0,146	-0,068	-0,960	1	
Silte	-0,149	0,092	-0,066	-0,475	0,264	1

¹ Densidade do solo.

A Equação (17) expressa a Função de Pedotransferência gerada para estimar a umidade volumétrica retida na camada de 40-60cm sob potencial de -1.500kPa.

$$\theta_{-1500kPa(40-60cm)} = 0,664321 - 0,318865*D_s + 0,359077*10^{-3}*ARG - 0,106037*10^{-2}*SILT \quad (17)$$

As variáveis Ds, CO e areia tiveram maior frequência de eliminação nas três camadas no potencial de -1.500kPa, devido à baixa correlação e não ter significância com o modelo. Este comportamento assemelha-se com o encontrado por Nebel (2009) quando a Ds foi eliminada por ter baixa correlação e não ser significativa com a variável resposta.

Nas Tabelas 23 e 24 é apresentado um resumo dos sete índices estatísticos, selecionados neste trabalho para avaliar o desempenho dos modelos obtidos nas tensões de -10, -33 e -1.500kPa para as três camadas de solo, correlacionando os dados estimados e os obtidos em laboratório e resultando na ótima aplicabilidade do modelo para estimativa precisa do fenômeno da retenção de água no solo.

Tabela 23 - Índices estatísticos de desempenho dos modelos que predizem a umidade na capacidade de campo, obtidos nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60cm, sob tensões de -10 e -33kPa

Índice	Conteúdo de água -10kPa			Conteúdo de água -33kPa		
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	0-20cm	20-40cm	40-60cm
d	0,999	0,999	0,994	0,798	0,963	0,996
r	0,998	0,998	0,988	0,697	0,931	0,993
c	0,997	0,997	0,982	0,556	0,896	0,989
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Mediano	Muito bom	Ótimo
ME	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
RMSE	0,001	0,000	0,009	0,026	0,023	0,003
CRM	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
EAM	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

d = Índice de concordância, r = Coeficiente de correlação, ME = Erro máximo, RMSE = Raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado, CRM = Coeficiente de massa residual, EAM = Erro absoluto médio, c = Coeficiente de desempenho, Desempenho = classificação segundo Camargo e Sentelhas (1997). Valores dos índices estatísticos para uma perfeita concordância dos modelos: d = 1, r = 1, ME = 0, RMSE = 0, CRM = 0 e EAM = 0 e $0,30 < c < 0,90$.

Tabela 24 - Índices estatísticos de desempenho dos modelos que predizem a umidade no ponto de murcha permanente, obtidos nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60cm, sob tensão de -1.500kPa

Índice	Conteúdo de água -1.500kPa		
	0-20cm	20-40cm	40-60cm
d	0,994	0,984	0,990
r	0,989	0,970	0,980
c	0,983	0,954	0,970
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Ótimo
ME	0,000	0,000	0,000
RMSE	0,006	0,011	0,009
CRM	0,000	0,000	0,000
EAM	0,000	0,000	0,000

Analisando os índices estatísticos de desempenho, pode-se concluir que há precisão nos modelos em virtude dos seus respectivos valores, o R^2 (elevado), e exatidão atribuída pelo índice de concordância (d com elevado valor) em que os valores próximo a 1 um indicativo a concordância perfeita entre os dados medidos e estimados.

O coeficiente de desempenho “c” foi classificado como ótimo, na maioria dos casos, o que confere uma boa capacidade preditiva da umidade volumétrica do solo pelas FPT geradas neste estudo, podendo ser adotadas como ferramenta no auxílio do manejo de irrigação em cana-de-açúcar.

As Funções de Pedotransferência em relação a tensão de -10kPa nas camadas de solo teve uma ótima capacidade em estimar umidade volumétrica de água no solo, devido aos elevados coeficientes de determinação (R^2) e coeficientes de correlação significativos.

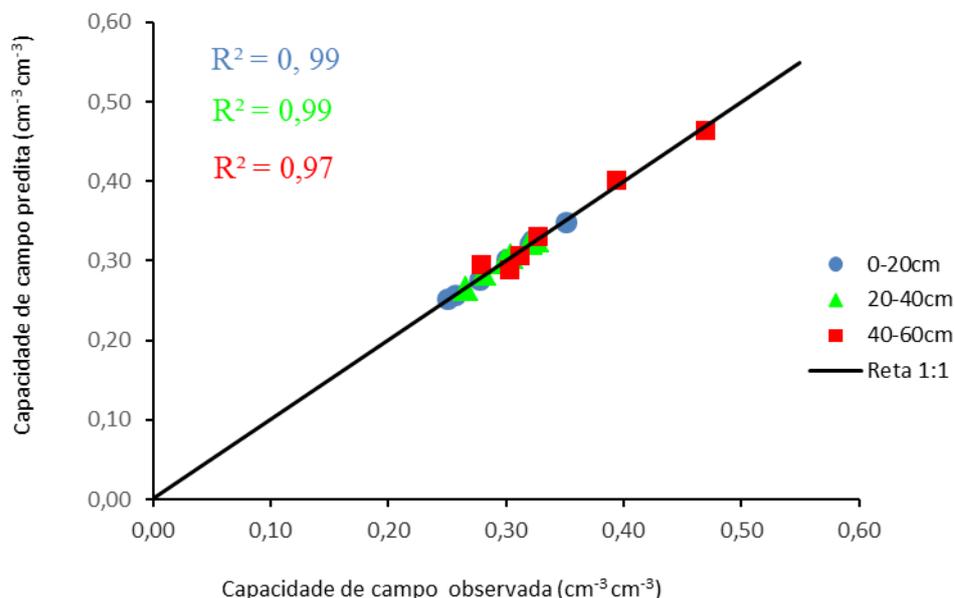
Na tensão de -33kPa a capacidade preditiva das FPTs foi aumentando gradativamente da camada superficial à subperifical do solo e o desempenho das mesmas foram classificadas como mediano, muito bom e ótimo.

Na tensão de -1.500kPa a ótima capacidade preditiva das FPTs pode estar associada ao grande número de amostras utilizadas no banco de dados.

A maioria das FPTs geradas nesta pesquisa para estimar a umidade volumétrica da retenção de água no solo, no local de estudo obtiveram altos coeficientes de determinação, mostrando uma ótima condição preditiva na sua utilização. Essas funções podem ser classificadas como pontuais, uma vez que, estima pontos específicos aplicados nas tensões de interesse para retenção de água no solo.

Na Figura 7 está ilustrada a correlação entre os dados observados e preditos, do conteúdo de água nas camadas de 0-20, 0-40 e 40-60cm na tensão de -10kPa. As FPTs apresentaram R^2 elevado, caracterizando alta capacidade preditiva.

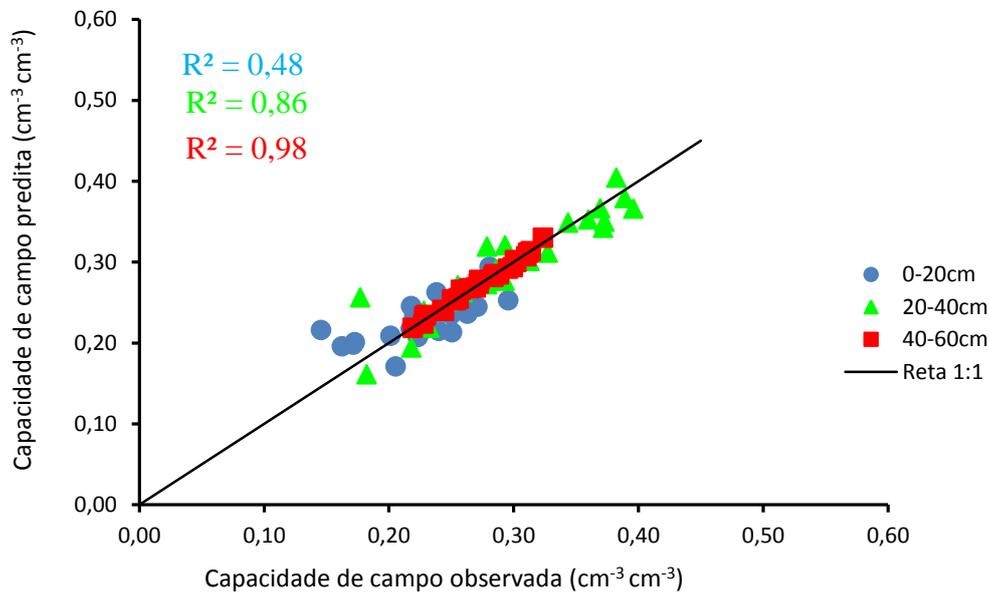
Figura 6 - Correlação entre os valores da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) preditos e observados equilibrados à tensão de -10kPa nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60 cm



A Figura 8 apresenta a comparação entre os dados observados e preditos, do conteúdo de água nas camadas de 0-20, 0-40 e 40-60cm e tensão de -33kPa. O baixo R^2 encontrado na FPT estabelecida para camada de 0-20cm indica que há dispersão dos dados preditos em comparação com o determinado em laboratório. Uma das razões para este resultado se deve a valores anômalos e dispersos em relação aos demais, o que resultou em um modelo que subestimou os valores da umidade medida. Além disso, este desempenho foi o único classificado como mediano. Portanto, para se obter à uma equação que se mostrasse significativa necessitou a eliminação de *outliers*. Segundo Costa (2012) as FPTs propostas por Saxton e Rawls (2006) também tiveram tendência de subestimá-los.

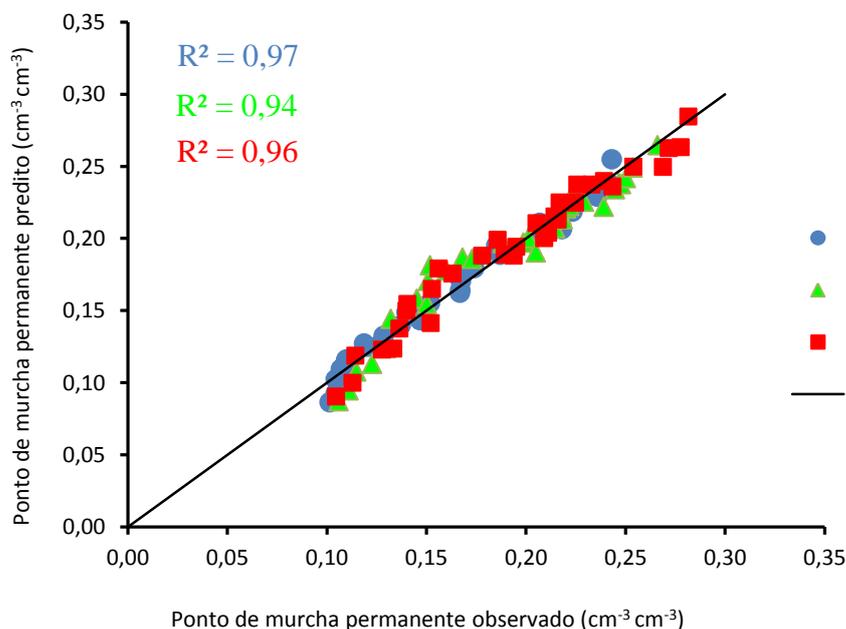
Nas camadas de 20-40 e 40-60cm os resultados dos indicadores estatísticos e a dispersão homogênea dos pontos em relação à reta 1:1 indicam que, as FPTs obtidas apresentam Muito boa e Ótima predição na estimativa da umidade do solo no potencial avaliado.

Figura 7 - Correlação entre os valores da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) preditos e observados equilibrados à tensão de -33kPa nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60cm



A Figura 9 mostra os resultados obtidos em laboratório comparados com os preditos pelo modelo proposto, nas três camadas estudadas sob tensão de -1.500kPa. As equações propostas para o conteúdo de água no solo são bastante precisas, pois os valores preditos estão mais próximos à reta 1:1, indicando menor dispersão dos valores obtidos pelas respectivas FPTs.

Figura 8 - Correlação entre os valores da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{mp}) preditos e observados equilibrados à tensão de -1.500kPa nas camadas de 0-20; 20-40 e 40-60cm



5 CONCLUSÕES

Os modelos de equações de Funções de Pedotransferência estimam com ótima precisão o conteúdo de água no solo nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60cm nas tensões de -10, -33 e -1.500kPa podendo subsidiar o manejo de irrigação.

Em potenciais matriciais específicos (-10, -33 e -1.500kPa) a capacidade preditiva da FPT apresentou ótimos coeficientes de determinação e correlação, para a obtenção da θ_{cc} e do θ_{pmp} .

As variáveis carbono orgânico e areia podem ser dispensadas para estimar a umidade na capacidade de campo nas tensões de -10 e -33kPa, respectivamente.

Para estimar a umidade no ponto de murcha (-1.500kPa) as variáveis densidade do solo, areia e carbono orgânico têm pouca influência nos modelos da FPT.

A variável densidade do solo teve maior influência na tensão de -10kPa para predição da umidade do solo, já no caso da tensão de -33kPa as variáveis silte, argila, carbono orgânico e densidade do solo tiveram maior influência na capacidade preditiva, devido ter alta correlação com a variável resposta.

As FPT geradas sob as condições deste estudo proporcionam maior agilidade no conhecimento das propriedades do solo importantes no estudo da dinâmica e manejo da água e do solo.

6 REFERÊNCIAS CITADAS

AFFÉRRI, A.; TRENTO, E.; PINTO, R. **Manual 1- Como fazer um plano diretor de irrigação de canaviais (PDIC)**. 2010. Disponível em: <<http://www.canapedeagua.com.br>>. Acesso em: 26 jul. 2014.

ALBUQUERQUE, J.A.; LUCIANO, R.V.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; COSTA, A. Retenção de água em diferentes frações de areia. **In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo**, Uberlândia, 2011. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas, 2011.

ALMEIDA, B.G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ, Piracicaba.

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

ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.

ASSAD, M.L.L.; SANS, L.M.A.; ASSAD, E.D.; JR, J.Z. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Passo Fundo, v.9. n. 3. p. 588-596, 2001.

BARBOSA, M.A.G. **Calibração e uso de sensores FDR (frequency domain reflectometry) para determinação da umidade e salinidade em dois diferentes tipos de solo**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, Mossoró, RN.

BARROS, A.H.C. **Desenvolvimento de Funções de Pedotransferência e sua utilização em modelos agro-hidrológicos**, 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Piracicaba, São Paulo.

BENITTES, V.M.; MACHADO, P.O.A.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, M.R.; MADARI, B.E.; LIMA, C.X. **Funções de Pedotransferência para Estimativa de Densidade dos Solos Brasileiros**. Rio de Janeiro, Embrapa solos. 2006.

BERNARDO, S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar. **Revista Alcoolbrás**, São Paulo, n.106, p.72-80, 2006.

BOUMA, J.; VAN LANEN, H.A.J. **Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities**. In: Quantified land evaluation procedures. Proceedings of the international workshop on quantified land evaluation procedures, Washington, DC, 1986.

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

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

BUDIMAN, M.; MC BRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M. de L.; SANTOS H.G. dos. **Revisão sobre funções de Pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. p. 50. (Documentos, n. 45).

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

CARVALHO, A.J.A.; SOUZA, E.H.; MARQUES, C.T.S.; GAMA, E.V.S.; NACIF, P.G.S. Caracterização física dos solos dos quintais agroflorestais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, BA. **Revista Brasileira de Agroecologia**, São Miguel das Matas, Bahia, v. 2. n. 2. p. 941-944. 2007.

CAVALCANTI, F.J. de A. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco**: 3. ed. Recife - Instituto Agrônomo de Pernambuco - IPA, 2008. 212p.

CHRISTOFFOLETI, P.J.; LÓPEZ-OVEJERO, R.F.; NICOLAI, M.; CARVALHO, S.J.P. **Manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar: novas moléculas herbicidas**. In: II SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2005, Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz Quieroz - ESALQ/POTAFOS, 2005. p. 1-11.

COELHO, E.F.; CONCEIÇÃO, M.A.F.; SOUZA, V.A.B. Estimativa dos limites de disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 45, n. 258, p.183-192, 1998.

COINVALORES. **Análises de mercado, especial perspectivas 2015**, p.44, 2015. Disponível em: <<http://www.coinvalores.com.br>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Safra 2014/2015, v. 1 n. 4 – Quarto Levantamento, Brasília, abr. 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

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

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

COUTO, L. **Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo**. Sete Lagoas: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Embrapa Milho e Sorgo, 2002. p. 65. (Circular Técnica, 21).

CRUSCIOL, C.A.C.; SILVA, M.A.; ROSSETO, R.; SORATTO, R.P. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**, Botucatu, SP, FEPAF, 2010.

ELLIOTT, E.T.; HEIL, J.W.; KELLY, E.F.; CURTIS M.H. Soil structural and other physical properties. In: ROBERTSON, G.P., COLEMAN, D.C., BLEDSOE, C.S., SOLLINS, P. (Ed.), **Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research**. Oxford University Press, Oxford, 1999.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2011. p. 212. Centro Nacional de Pesquisa de Solos.

FIDALSK, J.; TORMENA, C.A. Funções de Pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1316-1322, 2007.

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

GEVAERD, R.; FEITAS, S. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera, **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v, 21. n, 3. p. 59-73, 2006.

GIMENES, F.H.S. **Curva de retenção na avaliação da qualidade física do solo**. 2012. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Universidade de São Paulo -USP, Piracicaba, SP.

JEUNE, W. **Espacialização da densidade do solo e do estoque de carbono da Bacia Guapi - Macacu/RJ determinados por meio de Funções de Pedotransferência**. 2012. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ. Seropédica, RJ.

JORNALCANA. **Nordeste tem potencial para irrigar mais 340 mil hectares**. 2015. Disponível em: <www.jornalcana.com.br/nordeste-tem-potencial-para-irrigar-mais-340-mil-hectares>. Acesso em: 28 mar. 2015.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. 2. ed. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2012. 240 p.

LAMP, J.; KNEIB, W. **Zur quantitativen Erfassung und Bewertung von Pedofunktionen. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft**. Berlin, v. 32, p. 695-711, 1981.

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

LOPES-ASSAD, M.L. MARTINHO, P.R. **Funções de Pedotransferência para estimativa da disponibilidade de água em diferentes tipos de solos do Brasil**. Rio de Janeiro, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 2006. p. 1-18, Relatório Final.

LOVELAND, P.J.; WHALLEY, W.R. Particle size analysis. In: SMITH, K.A.; MULLIN, C.E. (Ed.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2000. v. 7, p. 281-314.

MANTOVANI, E.C.; BERNADO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: Princípios e métodos**. 3 ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355 p.

MARCOLIN, C.D. **Uso de Funções de Pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto**. 2009. 187 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma Função de Pedotransferência da densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MARQUES, D. **Guia da cana-de-açúcar**. Avanço científico beneficia o país. 2009. Disponível em: < http://cib.org.br/wp-content/uploads/2011/10/guia_cana.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2014.

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; JUNIOR, G.B.M. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**. Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

MEDEIROS, J.C. **Funções de Pedotransferência em estudos de funcionamento hídrico do solo na região sudeste do estado do Pará**. 2012. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Piracicaba.

MEDEIROS, J.C.; COOPER, M.; ROSA, J.D.; GRIMALDI, M.; COQUET, Y. Avaliação de Funções de Pedotransferência para estimar curvas de retenção de água do solo na região amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, n. 3. vol.38. p. 730-743, 2014.

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

MENDONÇA, E.S.de; MATOS, E.S. da. **Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises**. Viçosa: UFV, 2005. 107p.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-069, 2004.

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

MINASNY, B.; HARTEMINKY, A.E. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 106, n. 12. p. 52-62, 2011.

NASCIMENTO, G.; ANJOS, L.; PEREIRA, M.; FONTANA, A.; SANTOS, H. Funções de Pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p.560-569, 2010.

NEBEL, A.L.C. **Funções de Pedotransferência e estrutura de variabilidade espacial da retenção de água em solos de várzea do Rio Grande do Sul**, 2009. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Pelotas - UFPEL, Pelotas.

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

OTTONI, M.V. **Classificação físico-hídrica de solos e determinação da capacidade de campo in situ a partir de testes de infiltração**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, Rio de Janeiro.

PEREIRA, E.M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 253p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

RAWLS, W.J.Y.A.; PACHEPSKY, J.C.; RITCHIE, T.M.; SOBECKI, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**. Beltsville, v. 116, n. 1, p. 61-76, 2003.

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

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability for Rio Grande do Sul soil, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, 1547-1560, 2009.

RHEINHEIMER, D.S.; CAMPOS, B.C.; GIACOMINI, S.J.; CONCEIÇÃO, P.C.; BORTOLUZZI, E.C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p.435-440, 2008.

RIBEIRO Jr., J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Universidade Federal de Viçosa. 301p. 2001.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.128-152.

RYZAK, M.; BIEGANOWSKI, A.; WALCZAK, R.T. Application of laser diffraction method for determination of particles size distribution of grey-brown podzolic soil. **Research Agricultural Engineering**, Poland, v. 53. n. 1, p. 34-38, 2007.

SANTOS, M.A.L dos. **Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Um modelo de análise de decisão para o estado de Alagoas**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Piracicaba, SP.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

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

SEGATO, S. V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. 415 p.

SCARPARE, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo método agrohidrológico SWAP/WOFOST**, 2011. 163 p. Tese (Doutorado em Ciências), Escola Superior de Agricultura Luiz Quieroz - ESALQ, Piracicaba.

SHEIN, E.V.; ARKHANGEL' SKATA, T.A.S. Pedotransfer functions: state of the art, problems and outlooks. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 39, n. 10, p. 1090-1099, 2006.

SILVA, A.P.N.; LIMA, F.J.L.; SILVA, A.O.; MOURA, G.B.A. Valores efetivos de precipitação pluvial para manejo da irrigação na cana-de-açúcar em Goiana, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, vol. 5, n. 4, p. 585-591, 2010.

SILVA, C.L.; KATO, E. **Avaliação de modelos para previsão da infiltração de água em solos sob cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira Brasília, v.33, n.7, p.1149-1158, 1998.

SILVA, E da. **Funções de Pedotransferência para a retenção de água nos principais solos dos tabuleiros costeiros Brasileiros**. 2014. 36 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG.

SILVA, F.C. da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes/** Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. p. 370. Embrapa Solos, Embrapa Informática Agropecuária.

SINDAÇÚCAR. **Sindicato da Indústria do Açúcar e do Alcool no Estado de Pernambuco**. 2015. Disponível em: <www.sindicucar.com.br>. Acesso em: 08 abr. 2015.

SOARES, F.C. **Uso de diferentes metodologias na geração de Funções de Pedotransferência para a retenção de água em solos do rio Grande do Sul**, 2013. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS.

STERNBERG, J.C.; STILLS, H.S.; SCHWENDEMAN, R.H. Spectrophotometric analysis of multi-component systems using the least squares method in matrix form. **Analytical Chemistry**, v. 32, p. 84-90, 1960.

TAL for windows. Version. 4.2. - **texture autolockup**. 2008. Disponível em: <http://download.cnet.com/Texture-AutoLookup-TAL/3000-2054_4-10144157.html>. Acesso em 09 jan. 2015.

TERAMOTO, E.R. **Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) baseado em parâmetros do solo e do clima.** 2003. 86 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura Luiz Quieroz - ESALQ, Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba.

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

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Philadelphia, v. 163, n. 3, p. 190-202, 1998.

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.

TORMENA, C.A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivados sob diferentes sistemas de preparo de solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v, 59 n. 4. p. 795-801. 2002.

UNICA - **União da Agroindústria Canavieira de São Paulo.** Estatísticas. 2006. São Paulo: Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br/acao/cana.jsp>>. Acesso: em 12 nov. 2013.

URACH, F.L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação.** 2007.79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

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

VIEIRA, S.H.G.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; MONACO, P.A.V. **l.ôminas de irrigação em cana-de-açúcar para diferentes condições de disponibilidade hídrica.** Irriga, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, p. 137-148, 2015.

WHITE, R.E. **Princípios e práticas da ciência do solo. (O solo como um recurso natural).** 4 ed. São Paulo, 2009. 587 p.

WILLMOTT, C.J. Some comments of the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society.** Easton, v, 63. n. 11, p. 1309-1313, 1982.

APÊNDICE A - TABELAS

Tabela 25 – Coordenadas geográficas e classificação textural das amostras de solo utilizadas na estimativa de retenção de água no solo na profundidade de 0-20cm

Lote	Amostra	W	N	Classificação Textural	Tensão (kPa)	
					CC	PMP
31	1	281023,3012	9158265,417	argilo-arenoso	-33	-1.500
31	2	280684,8418	9158192,34	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
31	3	280650,6282	9157881,997	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
31	4	281088,0798	9157976,353	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	1	280441,3261	9158151,119	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
37	2	280097,2499	9158060,451	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	3	280159,3739	9157764,579	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
37	4	280529,1921	9157851,388	argilo-arenoso	-33	-1.500
38	1	280557,8466	9157599,162	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
38	2	280209,2144	9157532,496	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
38	3	280277,5241	9157225,118	areia	-10	-1.500
38	4	280608,745	9157309,664	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
41	1	279854,1228	9158007,268	argilo-arenoso	-33	-1.500
41	2	279913,7014	9157714,055	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
42	1	279969,993	9157465,516	areia	-10	-1.500
42	2	280033,4457	9157172,589	areia-franca	-10	-1.500
63	1	279381,0795	9157333,313	areia-franca	-10	-1.500
63	2	279032,6891	9157262,66	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
63	3	279014,7638	9156943,024	areia	-10	-1.500
63	4	279445,1791	9157049,355	franco-arenoso	-10	-1.500
64	1	279263,1747	9157873,405	argilo-arenoso	-33	-1.500
64	2	278980,3335	9157814,406	franco	-33	-1.500
64	3	279041,9776	9157513,877	argilo-arenoso	-33	-1.500
64	4	279325,065	9157587,24	argilo-arenoso	-33	-1.500
65	1	278733,7404	9157762,777	franco-argiloso	-33	-1.500
65	2	278314,6486	9157672,729	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
66	1	278067,7037	9157613,325	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
66	2	277824,9007	9157560,484	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
167	1	281919,383	9158156,732	argilo-arenoso	-33	-1.500
170	1	279508,0387	9157930,939	argilo-arenoso	-33	-1.500
170	2	279566,9847	9157638,983	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
171	1	279626,5277	9157387,919	franco-arenoso	-10	-1.500
171	2	279690,1332	9157100,463	franco-arenoso	-10	-1.500

Tabela 26 - Coordenadas geográficas e classificação textural das amostras de solo utilizadas na estimativa de retenção de água no solo na profundidade de 20-40cm

Lote	Amostra	W	N	Classificação Textural	Tensão (kPa)	
					CC	PMP
31	1	281023,3012	9158265,417	argilo-arenoso	-33	-1.500
31	2	280684,8418	9158192,34	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
31	3	280650,6282	9157881,997	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
31	4	281088,0798	9157976,353	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	1	280441,3261	9158151,119	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
37	2	280097,2499	9158060,451	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	3	280159,3739	9157764,579	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	4	280529,1921	9157851,388	argilo-arenoso	-33	-1.500
38	1	280557,8466	9157599,162	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
38	2	280209,2144	9157532,496	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
38	3	280277,5241	9157225,118	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
38	4	280608,745	9157309,664	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
41	1	279854,1228	9158007,268	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
41	2	279913,7014	9157714,055	argilo-arenoso	-33	-1.500
42	1	279969,993	9157465,516	areia	-10	-1.500
42	2	280033,4457	9157172,589	areia-franca	-10	-1.500
63	1	279381,0795	9157333,313	areia-franca	-10	-1.500
63	2	279032,6891	9157262,66	franco-arenoso	-10	-1.500
63	3	279014,7638	9156943,024	areia-franca	-10	-1.500
63	4	279445,1791	9157049,355	areia	-10	-1.500
64	1	279263,1747	9157873,405	argilo-arenoso	-33	-1.500
64	2	278980,3335	9157814,406	argilo-arenoso	-33	-1.500
64	3	279041,9776	9157513,877	argilo-arenoso	-33	-1.500
64	4	279325,065	9157587,24	argilo-arenoso	-33	-1.500
65	1	278733,7404	9157762,777	argilo-arenoso	-33	-1.500
65	2	278314,6486	9157672,729	argila	-33	-1.500
66	1	278067,7037	9157613,325	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
66	2	277824,9007	9157560,484	argilo-arenoso	-33	-1.500
167	1	281919,383	9158156,732	argilo-arenoso	-33	-1.500
170	1	279508,0387	9157930,939	argilo-arenoso	-33	-1.500
170	2	279566,9847	9157638,983	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
171	1	279626,5277	9157387,919	franco-arenoso	-10	-1.500
171	2	279690,1332	9157100,463	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500

Tabela 27 - Coordenadas geográficas e classificação textural das amostras de solo utilizadas na estimativa de retenção de água no solo na profundidade de 40-60cm

Lote	Amostra	W	N	Classificação Textural	Tensão (kPa)	
					CC	PMP
31	1	281023,3012	9158265,417	argilo-arenoso	-33	-1.500
31	2	280684,8418	9158192,34	argilo-arenoso	-33	-1.500
31	3	280650,6282	9157881,997	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
31	4	281088,0798	9157976,353	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	1	280441,3261	9158151,119	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	2	280097,2499	9158060,451	argilo-arenoso	-33	-1.500
37	3	280159,3739	9157764,579	argila	-33	-1.500
37	4	280529,1921	9157851,388	argila	-33	-1.500
38	1	280557,8466	9157599,162	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
38	2	280209,2144	9157532,496	argilo-arenoso	-33	-1.500
38	3	280277,5241	9157225,118	areia	-10	-1.500
38	4	280608,745	9157309,664	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
41	1	279854,1228	9158007,268	argilo-arenoso	-33	-1.500
41	2	279913,7014	9157714,055	argilo-arenoso	-33	-1.500
42	1	279969,993	9157465,516	areia	-10	-1.500
42	2	280033,4457	9157172,589	areia-franca	-10	-1.500
63	1	279381,0795	9157333,313	areia-franca	-10	-1.500
63	2	279032,6891	9157262,66	argilo-arenoso	-33	-1.500
63	3	279014,7638	9156943,024	areia	-10	-1.500
63	4	279445,1791	9157049,355	areia	-10	-1.500
64	1	279263,1747	9157873,405	argilo-arenoso	-33	-1.500
64	2	278980,3335	9157814,406	argila	-33	-1.500
64	3	279041,9776	9157513,877	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
64	4	279325,065	9157587,24	argila	-33	-1.500
65	1	278733,7404	9157762,777	argilo-arenoso	-33	-1.500
65	2	278314,6486	9157672,729	argila	-33	-1.500
66	1	278067,7037	9157613,325	argilo-arenoso	-33	-1.500
66	2	277824,9007	9157560,484	argilo-arenoso	-33	-1.500
167	1	281919,383	9158156,732	argilo-arenoso	-33	-1.500
170	1	279508,0387	9157930,939	argilo-arenoso	-33	-1.500
170	2	279566,9847	9157638,983	argilo-arenoso	-33	-1.500
171	1	279626,5277	9157387,919	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500
171	2	279690,1332	9157100,463	franco-argilo-arenoso	-33	-1.500

APÊNDICE B - FIGURAS

Figura 9 - Utilização de GPS para coleta das amostras de solo nos pontos georreferenciados.



Figura 10 - Coleta de amostras de solo não deformada com amostrador tipo Uhland.



Figura 11 - Amostras saturadas e na câmara de Richards.



Figura 12 - Coleta das amostras de solo deformadas com o trado holandês.



Figura 13 - Análises de determinação de carbono orgânico.

