



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS DE CERRO LARGO
CURSO DE AGRONOMIA

AUGUSTO GULARTT MELO

**CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVO *TDR* (*TIME DOMAIN REFLECTOMETRY*) PARA
ESTIMATIVA DE UMIDADE VOLUMÉTRICA EM LATOSSOLO**

CERRO LARGO-RS

2017

AUGUSTO GULARTT MELO

**CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVO TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) PARA
ESTIMATIVA DE UMIDADE VOLUMÉTRICA EM LATOSSOLO**

**Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do grau
de Bacharel em Agronomia da Universidade Fede-
ral da Fronteira Sul.**

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

CERRO LARGO-RS

2017

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Melo, Augusto Gulartt

Calibração de dispositivo TDR (Time Domain Reflectometry) para estimativa de umidade volumétrica em latossolo/ Augusto Gulartt Melo. -- 2017.

42 f.:il.

Orientador: Douglas Rodrigo Kaiser.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Agronomia, Cerro Largo, RS, 2017.

1. Características do solo e a relação com a água armazenada. 2. Métodos de determinação do teor de água no solo. 3. Reflectometria no domínio do tempo (TDR - time domain reflectometry). I. Kaiser, Douglas Rodrigo, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

AUGUSTO GULARTT MELO

**CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVO TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY) PARA
ESTIMATIVA DE UMIDADE VOLUMÉTRICA EM LATOSSOLO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser.

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:
01 / 12 / 2017.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser



Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira



Ms. Fábio José Andres Schneider

“Quem fez da modéstia uma virtude esperava que todos passassem a falar de si próprios como se fossem idiotas. O que é a modéstia senão uma humildade hipócrita, através da qual um homem pede perdão por ter as qualidades e os méritos que os outros não têm?”. (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

A mineralogia do solo influencia fortemente a determinação da umidade do solo com o uso da técnica de *TDR (Time Domain Reflectometry)*. Este estudo buscou estabelecer equações matemáticas de regressão entre a umidade conhecida (real) e a constante dielétrica (K_a) e compará-las com modelos considerados “universais”, bem como avaliar sua eficiência para um Latossolo. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 30 cm, peneiradas em malha de 2 mm e dispostas em cilindros de PVC de 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Nove amostras foram saturadas por ascensão capilar, uma deixada na condição de umidade de TFSA e um cilindro contendo somente água (condição de contorno). As leituras foram realizadas quando as amostras atingiram a saturação, seguindo até as amostras atingirem o ponto de murcha permanente. Para as demais (somente água e TFSA), foi realizada somente uma leitura. As leituras foram realizadas com sonda de 3 hastes. A cada leitura as amostras eram pesadas, obtendo a massa de solo úmido. Depois que as leituras foram finalizadas, o solo contido nos cilindros foi seco em estufa, obtendo a massa de solo seco. Foram ajustados modelos lineares, polinomiais e logarítmico entre a umidade real e a constante dielétrica para três situações, não utilizando e utilizando a condição de contorno e em intervalo de umidade real específica ($<0,4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). A precisão dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), pela linha 1:1, pelo erro padrão da estimativa, erro quadrático médio, erro percentual médio e raiz do quadrado médio do erro. Os modelos considerados “universais” não foram precisos o suficiente para estimar a umidade do solo estudado. A adoção da condição de contorno somente proporcionou melhor precisão para conteúdo de água $>0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A equação logarítmica, para intervalo de umidade específica ($<0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), apresentou grande acurácia. As equações linear CC, linear SC e logarítmica apresentaram melhor eficiência que as demais. A equação de determinação da θ_E que apresentou melhor acurácia e ótima precisão foi: $f(x) = 0,1681 \ln(x) - 0,1629$, quando $K_a \leq 34,7$.

Palavras-chave: Conteúdo de água no solo. Reflectometria. Constante dielétrica. Condição de contorno. Modelos matemáticos.

ABSTRACT

Soil mineralogy strongly influences the determination of soil moisture with the use of the TDR (Time Domain Reflectometry) technique. This study sought to establish mathematical regression equations between the known (real) moisture and the dielectric constant (K_a) and to compare them with models considered "universal", as well as to evaluate its efficiency for a Hapludox. The soil samples were collected in depth from 0 to 30 cm, sieved in 2 mm mesh and arranged in PVC cylinders 30 cm high and 10 cm in diameter. Nine samples were saturated by capillary rise, one left in the moisture condition of TFSA and one cylinder containing only water (boundary condition). The readings were performed when the samples reached saturation, followed by the samples reaching the permanent wilting point. For the others (water only and TFSA), only one reading was performed. The readings were performed with 3-stem probet each reading the samples were weighed, obtaining the soil mass moist. After the readings were finalized, the soil contained in the cylinders was greenhouse dried, obtaining the mass of dry soil. Linear, polynomial and logarithmic models were adjusted between real moisture and dielectric constant for three situations, not using and using the boundary condition and in specific real humidity range ($<0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). The precision of the models was evaluated by the coefficient of determination (R^2), by line 1: 1, by the standard error of the estimate, the mean square error, the mean error and the root mean square error. The models considered "universal" were not accurate enough to estimate the soil moisture content. The adoption of the contour condition only provided better accuracy for water content $> 0.40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. The logarithmic equation, for the specific moisture range ($<0.40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), showed a high accuracy. The linear CC, linear SC, and logarithmic equations showed better efficiency than the others. The linear CC, linear SC, and logarithmic equations showed better efficiency than the others. The equation of determination of θ_E that presented the best accuracy and optimal precision was: $f(x) = 0.1681 \text{ Ln}(x) - 0.1629$, when $K_a \leq 34.7$.

Keywords: Water content in soil. Reflectometry. Dielectric constant. Contour condition. Mathematical models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - TDR 6050X3K5B MiniTrase.....	22
Figura 2 - Alíquota de solo após peneiração com malha de 2 mm.....	23
Figura 3 – Obtenção de leitura da constante dielétrica (K_a) de solo sob saturação..	25
Figura 4 - Determinação da constante dielétrica (K_a) em solo sob ponto de murcha permanente (A - cilindros contendo solo sujeitos a mesa de tensão; B - leitura de K_a do solo).	26
Figura 5 - Transposição do solo presente nos cilindros para secagem em estufa.	26
Figura 6 - Comparativo entre os pontos indicativos da θ_R e dos modelos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), em relação a constante dielétrica (K_a) obtida pelo do equipamento de <i>TDR</i>	28
Figura 7 - Comparação entre as equações de regressão com condição de contorno e modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), ambos em relação a umidade volumétrica real (θ_R) das amostras.....	30
Figura 8 - Comparação entre as equações de regressão sem condição de contorno e modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), ambos em relação a umidade volumétrica real (θ_R) das amostras.....	30
Figura 9 - Margem de erro percentual para cada ponto de θ_E em relação a θ_R , de acordo com a sua respectiva equação e uso ou não da condição de contorno.	31
Figura 10 - Relação (gráfico 1:1) entre a θ_R e a θ_E dos modelos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) e equações de regressão com condição de contorno.	32
Figura 11 - Relação (gráfico 1:1) entre a θ_R e a θ_E das equações de regressão sem condição de contorno.	32
Figura 12 - Comparação entre as equações de regressão e os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), ambos em relação à umidade volumétrica real (θ_R) para faixas de umidade específicas.	33
Figura 13 - Margem de erro percentual para cada ponto de θ_E em relação a θ_R , para faixas de umidade volumétrica específica, de acordo com sua respectiva equação.	34
Figura 14 - Relação (gráfico 1:1) entre a θ_R e a θ_E das equações de regressão para faixas de umidade volumétrica real (θ_R) específicas.	35
Figura 15 – Equação de determinação da θ_E para Latossolo Vermelho.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria e composição mineralógica do solo estudado.	244
Tabela 2 - Relação entre a umidade volumétrica real (θ_R) e sua constante dielétrica (K_a) lida pelo equipamento de TDR.	28
Tabela 3 - Análise estatística dos modelos de determinação da curva de calibração para obtenção da umidade volumétrica estimada (θ_E) utilizando todas as faixas de umidade volumétrica real (θ_R).	29
Tabela 4 - Análise estatística dos modelos de determinação da curva de calibração para obtenção da umidade volumétrica estimada (θ_E) utilizando faixas de umidade volumétrica real (θ_R) específicas.	36

LISTA DE ABREVIATURAS

°C – grau Celsius

Al₂O₃ – óxido de alumínio

cm - centímetro

cm³ cm⁻³ - centímetro cúbico por centímetro cúbico

Fe₂O₂ – óxido de ferro

g cm⁻³ – gramas por centímetro cúbico

g kg⁻¹ – gramas por quilograma

km² - quilômetro quadrado

kPa – quilo pascal

m - metro

mm – milímetro

MnO – óxido de manganês

Ohm – resistência elétrica

SiO₂ – dióxido de silício

TiO₂ – dióxido de titânio

LISTA DE SIGLAS

CC	Com Contorno
EPM	Erro Percentual Médio
EQM	Erro Quadrático Médio
Ka	Constante dielétrica
LV	Latossolo Vermelho
PVC	Policloreto de Vinila
R ²	Coefficiente de Determinação
RQME	Raiz do Quadrado Médio do Erro
RS	Rio Grande do Sul
SC	Sem Contorno
<i>SEE</i>	<i>Standard Error of the Estimative</i> ou Erro Padrao da Estimativa
<i>TDR</i>	<i>Time Domain Reflectometry</i>
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	CARACTERÍSTICAS DO SOLO E A RELAÇÃO COM A ÁGUA ARMAZENADA	17
2.2	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO	18
2.2.1	Método gravimétrico	18
2.2.2	Blocos de resistência elétrica	18
2.2.3	Método de moderação de nêutrons	19
2.3	REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (<i>TDR – Time Domain Reflectometry</i>).....	19
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O solo e a água se apresentam como ponto de encontro entre as diferentes áreas das ciências naturais e sociais, em que o solo e a água estão/estiveram diretamente ligados a história humana, como a ocorrência de fluxos migratórios em busca de áreas mais férteis e/ou em busca de maior disponibilidade de água e pela transição do seu modo de vida caçador e coletor para a fixação do homem em um modo de vida sedentário, decorrente de condições ambientais favoráveis como a disponibilidade de água e condições de solo que propiciassem o domínio das culturas agrícolas, originando a agricultura como conhecemos hoje (MAZOYER & ROUDART, 2010; LEPSCH, 2011).

Com o crescimento populacional surgem vários entraves, a disponibilidade de alimento, água, moradia, condições básicas de saúde e infraestrutura são exemplos cotidianos da maioria, porém dentro destes existem fatores que, quando unidos, definem a eficiência de cada um deles. De acordo com FAOSTAT (2017), na década de 1970 a população mundial era de mais de 3,5 bilhões, porém em 2015 (última estimativa da FAOSTAT) a população mundial beirava os 7,35 bilhões de habitantes, onde a população quase duplicou de tamanho em cerca de 45 anos.

A preocupação da população nos dias de hoje está cada vez mais focada nos recursos naturais (solo e água), onde a adoção de práticas que favoreçam a racionalização quanto ao uso da água e manejo do solo (com métodos conservacionistas) tende a ser cada vez maior, além de que as ameaças à segurança alimentar são, principalmente, causadas pela degradação do solo e da terra e pelos recursos hídricos associados (KHAN, et al., 2009).

A gênese do solo compreende que cada localidade tende a apresentar um arranjo específico quanto a condição climática, chamado de mesoclima (KHLEBNIKOVA, 2009) onde, devido a distribuição espacial de formações rochosas (material de origem), poderá gerar solos diferentes.

No processo de gênese, o material rochoso esteve exposto a situações completamente diferentes, como clima, relevo e atividade biológica. O processo de intemperismo físico, químico e biológico é influenciado por estes, condicionando o tamanho das partículas do solo (granulometria), arranjo das partículas (estrutura), massa e volume do solo (densidade) e ocorrência de distintos tipos de minerais secundários e

disponibilidade de nutrientes (características químicas do solo). Devido a predominância de clima tropical e subtropical (no Brasil), esta condição tende a acelerar o processo de intemperismo de rochas e minerais primários, disponibilizando maiores teores de óxidos de ferro, alumínio e titânio (SANTOS, 2013).

A forma como manejamos o solo (mecanização, tipo de equipamento e conteúdo de água no solo durante operações) afeta diretamente o potencial de infiltração de água e no armazenamento desta no solo (REICHERT et al., 2007; MANCUSO et al., 2014).

A utilização de técnicas incorretas acaba por desencadear a alteração das condições originais daquele solo (HAMZA & ANDERSON, 2005), diminuindo seu potencial produtivo, tornando-o suscetível ao processo de erosão hídrica e/ou eólica (perda de MOS e escoamento superficial) e compactação da camada agricultável (aumento da densidade do solo, redução da porosidade, diminuição na capacidade de armazenamento de água, menos trocas gasosas no solo e redução da condutividade hidráulica).

A quantidade de água armazenada no solo depende de atributos do solo, ou seja, granulometria, textura, estrutura e porosidade, onde estes condicionarão os processos de capilaridade e adsorção, formando o que chamamos de potencial matricial do solo, onde a água, frações minerais (argila, silte e areia) e orgânicas (matéria orgânica do solo) desempenham interação de adesão (LEPSCH, 2011).

A quantidade e arranjo da fração mineral e orgânica proporciona dinâmicas diferentes para a água no solo, pois solos com maior teor de argila tendem a possuir capacidade de armazenamento de água mais elevado, devido a maior superfície específica da argila, onde o arranjo das partículas (minerais e orgânicas) condicionam a ocorrência de microporos, responsáveis pelo armazenamento e retenção da água (RUIZ et al., 2016).

Segundo Reichardt & Timm (2012), o teor de água no solo pode ser determinada a partir de diferentes métodos, onde pode ser elencado: Método Gravimétrico, Blocos de Resistência Elétrica, Método de Moderação de Nêutrons e Reflectometria no Domínio do Tempo ou *Time Domain Reflectometry (TDR)*. Porém, cada método pode apresentar vantagens ou desvantagens.

As diferenças entre métodos podem ser classificadas devido a perturbação gerada no solo (método destrutivo ou não), a eficiência de determinação do teor de água no solo (fator de correlação maior ou menor), necessidade de calibração periódica,

insalubridade pelo uso do equipamento, nível técnico para operação (mais complexo ou intuitivo), capacidade de se estratificar as profundidades de coleta de dados (possibilidade ou não) e devido aos custos do equipamento.

O uso de equipamento de *TDR* busca abranger diversas lacunas existentes no meio rural, como: gerenciamento adequado de sistemas de irrigação, já que o setor agropecuário consome aproximadamente 60% da água no Brasil (FAO, 2010), podendo provocar molhamento excessivo das culturas agrícolas; reduzir o desperdício de água; delimitação do grau de umidade máximo para tráfego de equipamentos e máquinas agrícolas na lavoura, onde a não obediência deste parâmetro pode acarretar na compactação do solo (HORN & LEBERT, 1994; KLEIN et al., 2008; SEVERIANO et al., 2010), com a conseqüente diminuição da infiltração de água, aumento da probabilidade de escoamento superficial, processos erosivos e restrições ao crescimento e desenvolvimento radicular (LIPIEC et al., 2003; REICHERT et al., 2007; MANCUSO et al., 2014).

Solos altamente intemperizados tendem a concentrar grande quantidade de óxidos de ferro, óxidos de alumínio e óxidos de titânio (VENDRAME et al., 2011; CORREA et al., 2008), sendo esta uma característica para determinação do grau de evolução de solos.

As principais equações, embutidas a equipamentos de *TDR*, são as propostas por Topp (1980) e Ledieu (1986). A equação de Topp é tida como “universal”, porém a sua calibração deriva de solos oriundos de locais com condições climáticas (clima temperado) diferentes do Brasil (clima tropical e subtropical). Portanto, a utilização destes modelos para determinação do teor de água no solo pode não se adequar a condição dos solos brasileiros. Devido a predominância de solos altamente intemperizados, como os Argissolos e Latossolos e a grande ocorrência de óxidos de ferro, alumínio e titânio, tornando-se o principal limitante para a utilização de tais modelos “universais” (ROBINSON et al., 1995).

A ocorrência destes óxidos tende a alterar o comportamento de modelos não específicos para solos brasileiros (latossolos, argissolos), portanto, a calibração do equipamento de *TDR* deve ser feita para cada local, podendo não ser adequada a utilização de modelos genéricos e/ou universais ou oriundos de condições climáticas distintas (ROBINSON et al., 1995; KAISER et al., 2010).

Este estudo buscou estabelecer equações matemáticas de regressão entre a umidade conhecida (real) e a constante dielétrica (K_a) e compará-las com modelos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), considerados “universais”, para a condição de Latossolo Vermelho, pertencente a área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS *campus* Cerro Largo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO E A RELAÇÃO COM A ÁGUA ARMAZENADA.

A quantidade de água armazenada no solo depende de fatores relacionados a física do solo, ou seja, textura, estrutura e porosidade, onde estes condizionarão os processos de capilaridade e adsorção, formando o que chamamos de potencial matricial do solo, onde a água, frações minerais (argila, silte e areia) e orgânicas (matéria orgânica do solo) desempenham interação de adesão (LEPSCH, 2011).

A capacidade de retenção de água no solo apresenta alta correlação com a textura e agregação do solo, onde os diferentes teores de fração argila, silte e areia proporcionam condições distintas para o armazenamento (distribuição e tipo de poros) e retenção de água no solo (potencial matricial). A fração argila apresenta maior número de partículas e área superficial específica, alterando a quantidade e tamanho dos poros. A ocorrência de interações de coesão argila-água propicia maior volume de água a ser armazenado por unidade de área, disponibilizando-a para o sistema radicular das culturas agrícolas durante mais tempo e sem afetar as trocas gasosas com a atmosfera, além da evaporação se desenvolver de forma gradativa (GREENWOOD & MCKENZIE, 2001).

O diâmetro elevado das partículas de areia (0,06 mm e 2,0 mm), quando comparadas com partículas da fração argila (menor que 0,002 mm) impede que ocorra maior potencial matricial, onde a água acaba sendo perdida com maior facilidade (percolação e/ou evaporação), devido a menor área superficial da fração areia (adesão água-areia ocorre em menor quantidade) (ABNT, 1995)

No Brasil tem-se a ocorrência de 13 classes de solo (SANTOS, 2013), onde há predominância de Latossolos e Argissolos, representando 31% e 27%, respectivamente, do território brasileiro. Pelo Brasil estar localizado em área de ocorrência de clima quente e úmido (altas temperaturas, índice pluviométrico elevado), o intemperismo atinge maior potencial de degradação dos substratos (material de origem), acarretando em solos com maior grau de evolução (ausência ou baixa concentração de minerais primários, maior presença de óxidos de ferro e óxidos de alumínio e maior profundidade), como ocorre nos Latossolos e Argissolos (CORREA et al., 2008).

Além das partículas de origem mineral, tem-se a matéria orgânica do solo, onde esta desempenha papel aditivo a qualidade do solo, fornecendo maior estabilização

da estrutura do solo, atuando no processo de agregação e formação da porosidade (SANTOS, G. A et al., 2008, p. 484). A ocorrência de maiores teores de matéria orgânica acaba por propiciar maior elasticidade ao solo, onde afetará diretamente o arranjo das partículas minerais (espaçamento) e aumento do valor da pressão de preconsolidação, agindo, desta forma, para maiores teores de poros no solo, ligado diretamente com a capacidade de armazenamento, infiltração e distribuição da água no solo (IORI et al., 2012).

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO.

2.2.1 Método gravimétrico

“Pelo método gravimétrico padrão de estufa, o teor de água no solo é determinado de forma direta e seu valor expresso em percentagem de umidade em massa[...]”. (BRAGA et al., 2013, p. 2). Uma amostra de solo coletada é pesada, posteriormente colocada em estufa a 105°C por 24h, pesada novamente e a diferença entre massas é a quantidade de água presente na amostra (REICHARDT & TIMM, 2012).

O método gravimétrico é tido como padrão, para determinação de teor de água no solo, porém é destrutivo (amostra deve ser removida do local), requer operador com nível de conhecimento técnico elevado e os resultados não são conhecidos instantaneamente (ao menos 48h após a coleta).

2.2.2 Blocos de resistência elétrica

Método indireto, não-destrutivo e pode ser utilizado para monitoramento e transferência de dados em tempo real. Baseia-se no princípio de resistência elétrica, onde um bloco de gesso, *nylon* ou fibra de vidro, contendo um par de eletrodos, é introduzido até a profundidade do solo a ser estudada, onde tal bloco irá absorver a umidade ali presente, gerando uma resistência elétrica entre os eletrodos, onde esta resistência deverá ser correlacionada a um grau de umidade pré definida, através de calibração prévia do equipamento para o solo estudado (REICHARDT & TIMM, 2012).

De acordo com Calbo (2005), as vantagens deste método de determinação de umidade do solo são: baixo custo de implantação, facilidade de fabricação e ampla

faixa de operação (50 a 1500 kPa). Apresenta desvantagens quanto a calibração periódica e individual de cada sensor e pela impossibilidade de se trabalhar com faixas de tensão abaixo de 50 kPa, as mais recomendadas para monitoramento de culturas agrícolas.

2.2.3 Método de moderação de nêutrons

Método indireto, não destrutivo e de grande dificuldade em se estratificar a profundidade de coleta de dados. Baseia-se na “[...]propriedade dos núcleos de hidrogênio do solo de dispersar e reduzir a velocidade dos nêutrons.” (NETO, 1994, pg. 58).

A sonda deve ser inserida no solo através de um tubo de acesso, onde há um emissor de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos, pois com a emissão dos neutros rápidos, estes acabam por se chocar com os átomos de hidrogênio da água (H₂O), resultando na diminuição de sua velocidade e captação pelo detector, resultando na determinação da umidade do solo (CHANASYK & NAETH, 1996). Este método apresenta alta correlação para solos minerais, porém solos com altos teores de matéria orgânica esta técnica não é recomendada. Porém, é um método que depende de conhecimento técnico prévio do operador, é altamente insalubre (pois utiliza elemento radioativo em sua operação) e depende de liberação por parte de órgãos governamentais para operação (devido a utilização de elemento radioativo).

2.3 REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (*TDR – Time Domain Reflectometry*).

A Reflectometria no Domínio do Tempo (Time Domain Reflectometry, *TDR*) é uma técnica relativamente nova para determinação do conteúdo de água no solo (TOPP, 1980), onde apresenta diversas vantagens, pois trata-se de um método não destrutivo, a determinação pode ser realizada a campo, apresenta alta correlação de dados quando comparado com o método gravimétrico (padrão), facilidade de operação do equipamento e possibilidade de se obter dados em tempo real (quando o equipamento dispor de tal funcionalidade). O número de hastes do equipamento deve ser de ao menos duas, onde o uso de maior número de hastes tende a aumentar a capacidade de penetração das ondas eletromagnéticas.

O equipamento de *TDR* funciona a partir da emissão de ondas eletromagnéticas, onde a propagação destas (no solo) é condicionada pelos materiais ali presentes (água, material mineral, matéria orgânica e ar). A partir do tempo que a onda leva para se disseminar no solo, é gerada constante dielétrica (K_a) do meio. Cada material apresenta constante dielétrica diferente, atrasando ou acelerando a propagação das ondas eletromagnéticas geradas pelo equipamento (ROBINSON et al., 1995). Após conhecido o K_a , tal valor é incluído em equação embutida ao equipamento, determinando a umidade volumétrica do solo amostrado.

De acordo com Kaiser (2010), cada material presente no solo apresenta constante dielétrica diferente, seja a água nele presente ($K_a= 81$), o ar ($K_a= 1$) e material mineral e matéria orgânica do solo ($K_a= 2$ a 7). Pela água apresentar o maior K_a , quanto maior o K_a lido, maior o conteúdo dela no solo, conseqüentemente atrasando a propagação das ondas geradas pelo equipamento de *TDR*.

A determinação da constante dielétrica aparente (K_a) é parte fundamental, pois a partir dela são executadas alterações na equação da umidade volumétrica (θ) do solo. A constante dielétrica apresenta pouca correlação entre locais distintos, ou seja, uma constante dielétrica obtida em um determinado solo não fornecerá dados reais para outro (KAISER, 2010; SONCELA et al., 2013; GUBIANI et al., 2015), pois as condições de cada local são específicas (grau de intemperismo do solo, material de origem, teor de matéria orgânica, presença de óxidos de ferro, alumínio ou titânio), sendo necessária uma nova calibração da equação para cada solo.

Características como granulometria (predominância de fração argila ou areia) densidade do solo (compactação), estrutura, agregação, teor de MOS e teor de óxidos de ferro e/ou alumínio estão diretamente relacionadas ao armazenamento de água no solo, condicionando a determinação da constante dielétrica do solo, onde diversos autores refutam a possibilidade de se realizar uma equação universal (PUMPANEN & ILVESNIEMI, 2008; KAISER, 2010; SKIERUCHA et al., 2012), devido a peculiaridade de cada solo.

A constante dielétrica é obtida a partir da seguinte equação:

$$Ka = \left(\frac{tc}{L}\right)^2$$

Ka= Constante dielétrica

c= Velocidade da luz em centímetros por nanosegundos

t= Tempo que a onda leva para percorrer a haste

L= Comprimento da haste (m)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A curva de calibração do equipamento de TDR foi realizada no laboratório de Pedologia e Física dos Solos, da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) - *campus* Cerro Largo. O solo utilizado no experimento foi proveniente da área experimental deste *campus*. A classificação deste solo é Latossolo Vermelho, segundo Santos (2013).

O equipamento de *TDR* utilizado foi o 6050X3K5B MiniTrase (Figura 1). Tal equipamento gera a constante dielétrica (K_a) do meio em que a sonda está em contato, sendo K_a incluído em modelo matemático embutido em sua memória (modelo pré estabelecido, “universal”), fornecendo a umidade volumétrica (θ) do meio amostrado. O equipamento opera utilizando equação “universal”, portanto, o valor de θ fornecido pelo aparelho será desconsiderado, somente levando em consideração o valor de K_a .

Figura 1 - TDR 6050X3K5B MiniTrase.



Fonte: Elaborado pelo autor

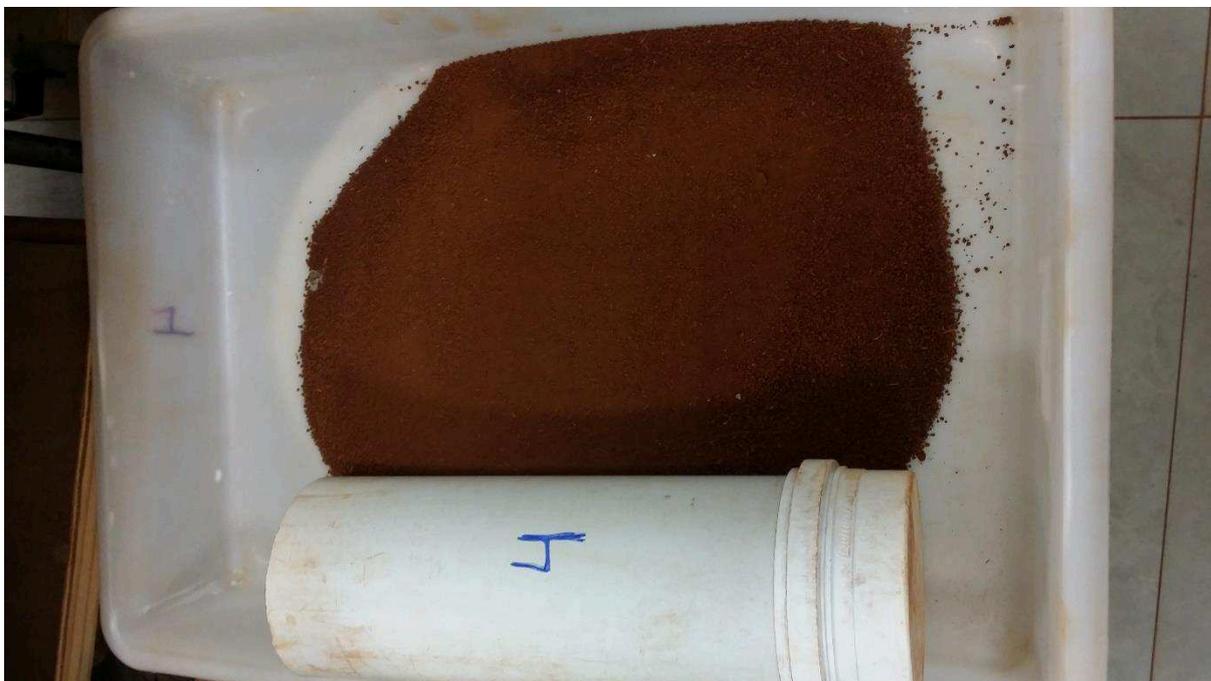
A sonda de *TDR*, de 3 hastes, foi utilizada em conjunto com cabo coaxial de 3m e impedância de 50 Ohm, ligado ao equipamento de TDR. O armazenamento dos dados foi realizado por *Tablet*, marca Samsung, dispendo de aplicativo específico para o gerenciamento dos dados (assumindo a função de *datalogger*).

A metodologia seguida constou de coleta de 35 sub amostras, de solo deformado, de forma aleatória, ao longo da área experimental, com profundidade de 0 a 30cm, resultando em um montante de aproximadamente 200 kg de solo. A amostra seguiu as recomendações de preparo de amostras para análise física, descrito pelo Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2011). A amostra foi alocada em local abrigado das intempéries, espalhada sobre lona plástica, destorroada e homogeneizada. A amostra principal (composta pelas sub-amostras) foi seca ao ar.

A secagem ao ar compreende período de tempo necessário para que a amostra reduza sua umidade. A amostra foi revolvida diariamente, visando acelerar o processo de secagem.

Após atingir teor de umidade gravimétrica constante foi obtida a terra fina seca ao ar (TFSA). A amostra foi peneirada com malha de 2,0 mm de diâmetro (Figura 2). Foram retiradas 10 alíquotas da amostra peneirada, onde cada uma delas foi acondicionada em cilindros de PVC (policloreto de vinila), devidamente numerados, de 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura.

Figura 2 - Alíquota de solo após peneiração com malha de 2 mm



Fonte: Elaborado pelo autor

Cada alíquota foi acondicionada gradualmente, a cada 2,0 cm no interior dos cilindros (GUBIANI, 2015), onde tal condição visa garantir parâmetros semelhantes a cada amostra, não interferindo na determinação de Ka a densidade do solo (TOPP et

al., 1980). A densidade do solo, no interior dos cilindros, foi aferida baseando-se na relação massa de solo por volume do cilindro, onde os cilindros tem sua massa individual conhecida. A adição de solo ao cilindro foi realizado sobre balança de precisão. A densidade média das amostras foi de $1,01 \text{ g cm}^{-3}$.

A granulometria do solo utilizado foi obtida a partir da análise granulométrica, definida pelo Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2011). A composição mineralógica do solo foi obtida a partir de BRASIL (1973). Ambas análises estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria e composição mineralógica do solo estudado.

Solo	Argila ⁽¹⁾	Silte ⁽¹⁾	Areia ⁽¹⁾	g kg ⁻¹				
				SiO ₂ ⁽²⁾	Al ₂ O ₃ ⁽²⁾	Fe ₂ O ₂ ⁽²⁾	TiO ₂ ⁽²⁾	MnO ⁽²⁾
LV – Cerro Largo	572	331	97	245	211	246	45	2,9

Fonte: ⁽¹⁾ Dados obtidos a partir de análise granulométrica do solo local; ⁽²⁾ Dados mineralógicos obtidos de Brasil (1973).

Das 10 alíquotas retiradas da amostra principal, 9 foram sujeitas a saturação por ascensão capilar e 1 (uma) deixada sob condição de TFSA (sem molhamento). Mais um cilindro foi utilizado, contendo somente água (condição de contorno). A leitura ocorrendo em cilindro preenchido somente com água visa garantir melhor estimativa do conteúdo de água no solo, sendo retratada como “condição de contorno”, segundo Gubiani et al. (2015).

Os cilindros contendo solo foram submetidos a saturação durante 48h, onde as leituras se iniciaram a partir do momento em que a lâmina de água atingiu a superfície do solo presente no cilindro (Figura 3). A sonda de TDR de 3 hastes foi inserida verticalmente no centro do cilindro. A sonda utilizada apresenta hastes com comprimento de 0,2 m, 0,003 m de diâmetro e hastes espaçadas em 0,022 m. Para os cilindros contendo TFSA e somente água, foi realizada somente uma leitura.

Figura 3 – Obtenção de leitura da constante dielétrica (K_a) de solo sob saturação.

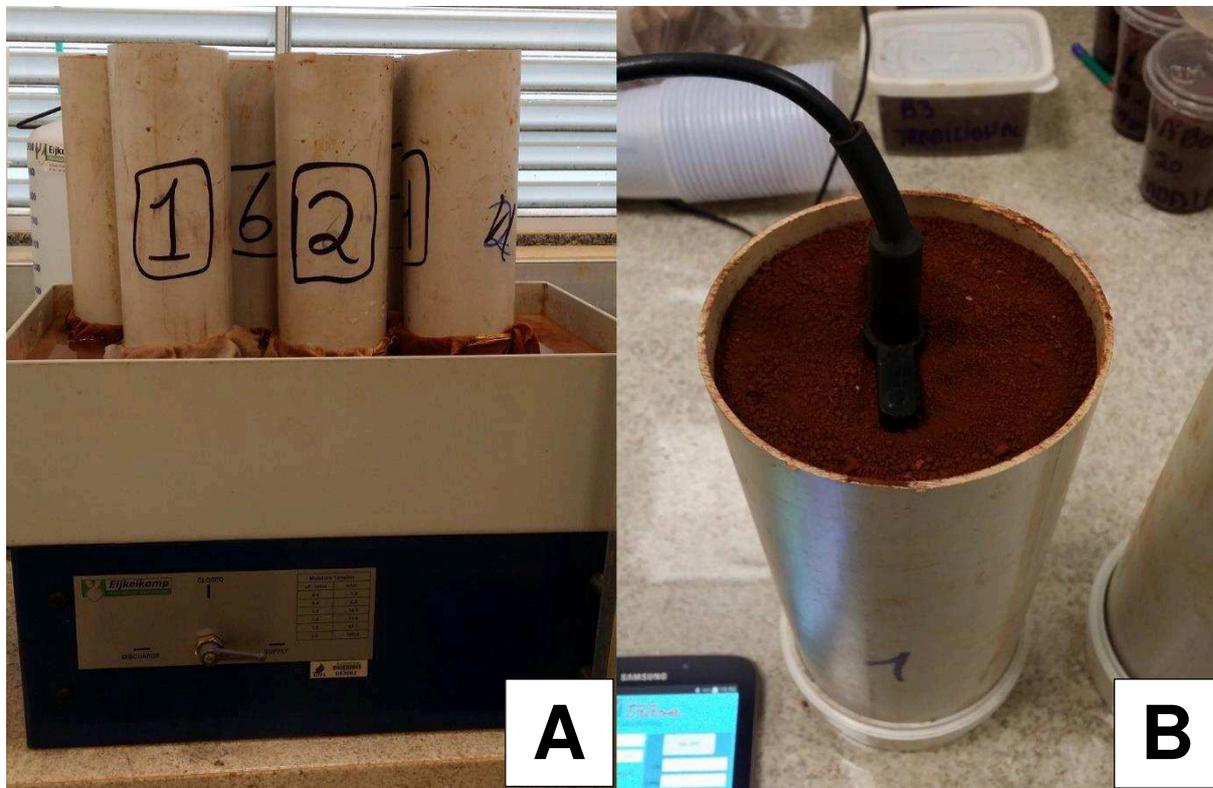


Fonte: Elaborado pelo autor

Cada cilindro foi considerado com um ponto de leitura. Após submetidas as leituras sob saturação, as amostras foram submetidas a mesa de tensão (Figura 4A), seguindo o proposto por EMBRAPA (2011), visando reduzir o teor de água de forma gradual. As leituras acompanharam a perda gradual de água, visando gerar dados de K_a em faixas distintas do conteúdo de água presente no solo dos cilindros.

Após realizada a leitura de K_a (Figura 4B), o cilindro foi imediatamente pesado (obtendo a massa de solo úmido) e o solo presente nos cilindros retirado dos mesmos (Figura 5) e submetido a secagem em estufa, a 105°C , até atingir massa constante, para determinação da massa de solo seco. O solo já desidratado foi pesado e, com os valores do solo úmido e seco, foi realizado cálculo para determinar a umidade volumétrica real (θ_R) de cada amostra.

Figura 4 - Determinação da constante dielétrica (K_a) em solo sob ponto de murcha permanente (A - cilindros contendo solo sujeitos a mesa de tensão; B - leitura de K_a do solo).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5 - Transposição do solo presente nos cilindros para secagem em estufa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante dos valores de K_a e θ_R , foram realizadas equações de regressão (linear, polinomial de terceiro grau e logarítmica) em três condições, utilizando e não utilizando a medida de K_a obtida no cilindro com somente água (condição de contorno) e levando em conta o intervalo que compreende valores de $\theta_R \leq 0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, onde esta faixa de umidade volumétrica é considerada relevante para o manejo de solos agrícolas (FIGUEIREDO et al. 2000; SEVERIANO et al., 2010). Os dados obtidos através das equações de regressão foram comparados aos valores de θ_E obtidos por modelos matemáticos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), [1] e [2], respectivamente.

$$\theta = 0,0000043K_a^3 - 0,00055K_a^2 + 0,029K_a - 0,053 \quad [1]$$

$$\theta = 0,1138\sqrt{K_a} - 0,1758 \quad [2]$$

A eficiência dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), pela linha 1:1 entre a θ_R e θ_E , pelo erro padrão da estimativa (*SEE - Standard Error of the Estimative*), erro quadrático médio (EQM), erro percentual médio (EPM) e raiz do quadrado médio do erro (RQME). A análise de dados foi realizada com o *software Libre Office Calc*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

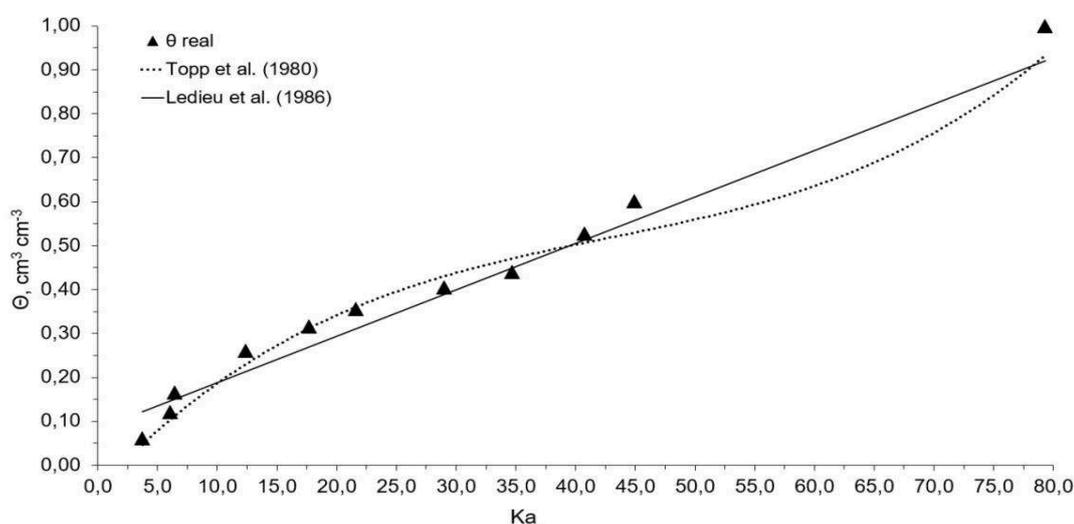
Foi realizada a associação entre a constante dielétrica (K_a) lida em cada amostra e sua respectiva umidade volumétrica real (θ_R), conforme Tabela 2. Os modelos matemáticos de estimativa da umidade volumétrica (θ_E), propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), foram comparados a estes pontos de θ_R (Figura 6). O modelo de Topp et al. (1980) proporcionou valores de erro percentual médio (EPM) variando entre -8,28% (com e sem contorno) e -10,76% (condição de θ_R específica). O uso do modelo de Topp et al. (1980) subestima valores de θ_E quando $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} > \theta_R > 0,53 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. O modelo de Ledieu et al. (1986) tende a provocar as mesmas distorções, subestimando valores de θ_E quando $\theta_R < 0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, além de superestimar a θ_E quando $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} < \theta_R < 0,53 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 9, Figura 10).

Tabela 2 - Relação entre a umidade volumétrica real (θ_R) e sua constante dielétrica (K_a) lida pelo equipamento de TDR.

Dados	Cilindro										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\theta_r, \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0,06	0,12	0,17	0,26	0,32	0,36	0,40	0,44	0,53	0,60	1,00
K_a	3,7	6,1	6,5	12,4	17,7	21,6	29,0	34,7	40,8	44,9	79,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Comparativo entre os pontos indicativos da θ_R e dos modelos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), em relação a constante dielétrica (K_a) obtida pelo do equipamento de TDR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As equações de regressão com condição de contorno, geradas a partir dos dados da θ_R e dos valores de K_a obtidos pelo equipamento de TDR, estão expostas na Figura 7. A equação polinomial de terceiro grau apresentou melhor coeficiente de determinação ($R^2=0,99$), quando comparada a equação linear ($R^2=0,98$). Porém, o erro padrão da estimativa (SEE), erro quadrático médio (EQM), erro percentual médio (EPM) e raiz do quadrado médio do erro (RQME) da equação linear foram inferiores (menor erro) aos obtidos pelo modelo polinomial (Tabela 3). Desta forma, mesmo o modelo linear apresentando R^2 inferior, sua precisão foi superior a equação polinomial. A equação polinomial apresentou propensão a superestimar valores de θ_E quando $\theta_R < 0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $\theta_R > 0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Já a equação linear, teve menor precisão quando a $\theta_R < 0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, acarretando em valores de θ_E superestimados, seguido de valores de θ_E subestimados no intervalo de $0,17 < \theta_R < 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 9, Figura 10).

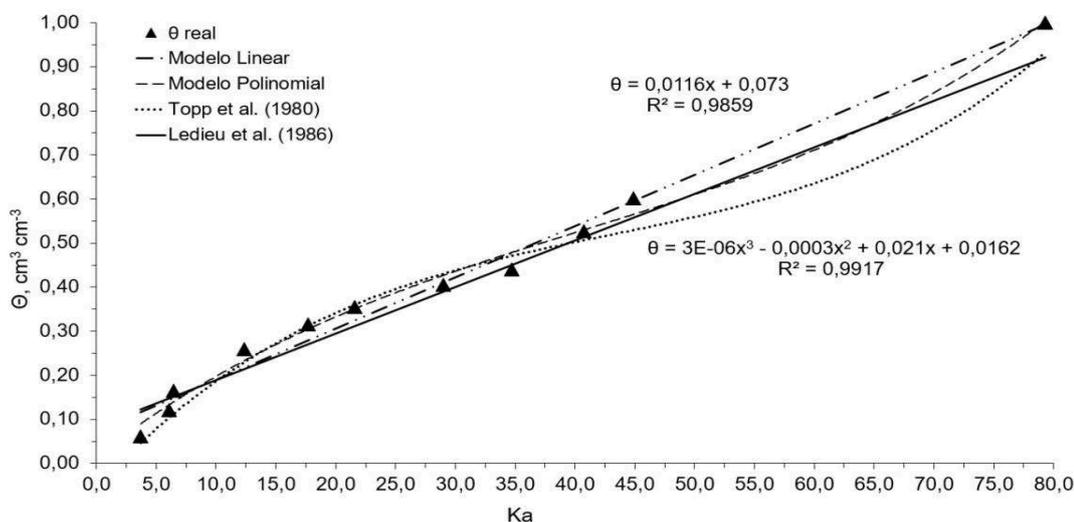
Tabela 3 - Análise estatística dos modelos de determinação da curva de calibração para obtenção da umidade volumétrica estimada (θ_E) utilizando todas as faixas de umidade volumétrica real (θ_R).

Modelos	Parâmetros estimados			Coef. Linear	R^2	$SEE^{(5)}$	EQM ⁽⁶⁾	EPM ⁽⁷⁾	RQME ⁽⁸⁾
	K_a	K_a^2	K_a^3						
Polinomial CC ⁽¹⁾	0,021	0,0003	3E-06	0,016	0,9917	0,103	0,0088	-9,046	0,0936
Polinomial SC ⁽²⁾	0,0391	0,0013	2E-05	0,060	0,9971	0,133	0,0012	-48,501	0,1191
Linear CC ⁽³⁾	0,0116	-	-	0,073	0,9859	0,033	0,0009	-6,290	0,0298
Linear SC ⁽⁴⁾	0,0115	-	-	0,075	0,9650	0,034	0,0010	-4,507	0,00941
Topp et al. (1980)	0,029	5,5E-04	4,3E-06	0,053	-	0,042	0,5098	8,280	0,0382
Ledieu et al. (1986)	0,1138	-	-	0,176	-	0,063	0,0805	7,944	0,0571

⁽¹⁾ Polinomial com contorno; ⁽²⁾ Polinomial sem contorno; ⁽³⁾ Linear com contorno; ⁽⁴⁾ Linear sem contorno; ⁽⁵⁾ Erro padrão da estimativa; ⁽⁶⁾ Erro quadrático médio; ⁽⁷⁾ Erro percentual médio; ⁽⁸⁾ Raiz do quadrado médio do erro, medido em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Fonte: Elaborado pelo autor

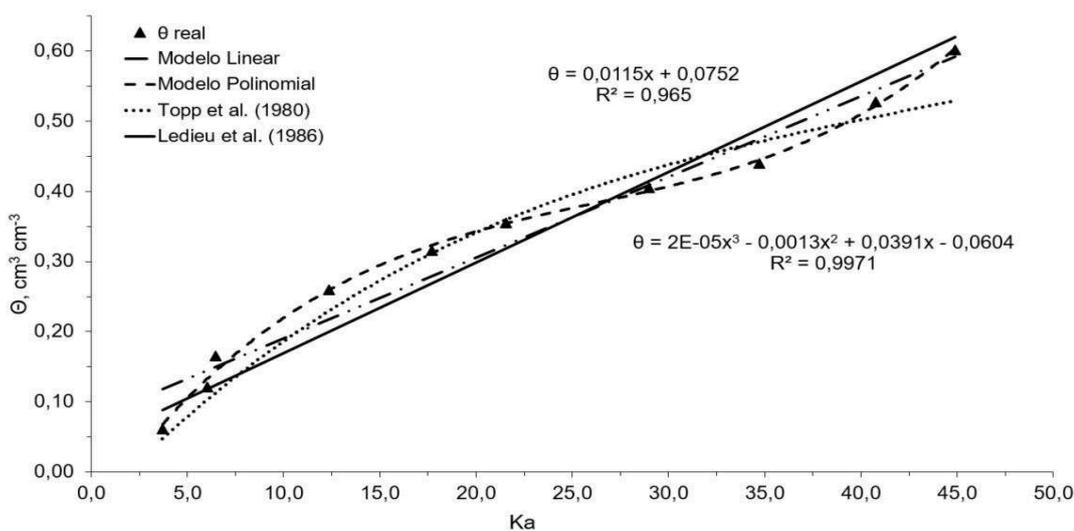
Figura 7 - Comparação entre as equações de regressão com condição de contorno e modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), ambos em relação a umidade volumétrica real (θ_R) das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor

As equações de regressão sem condição de contorno foram geradas sem utilizar o valor de Ka do cilindro contendo somente água (Figura 8).

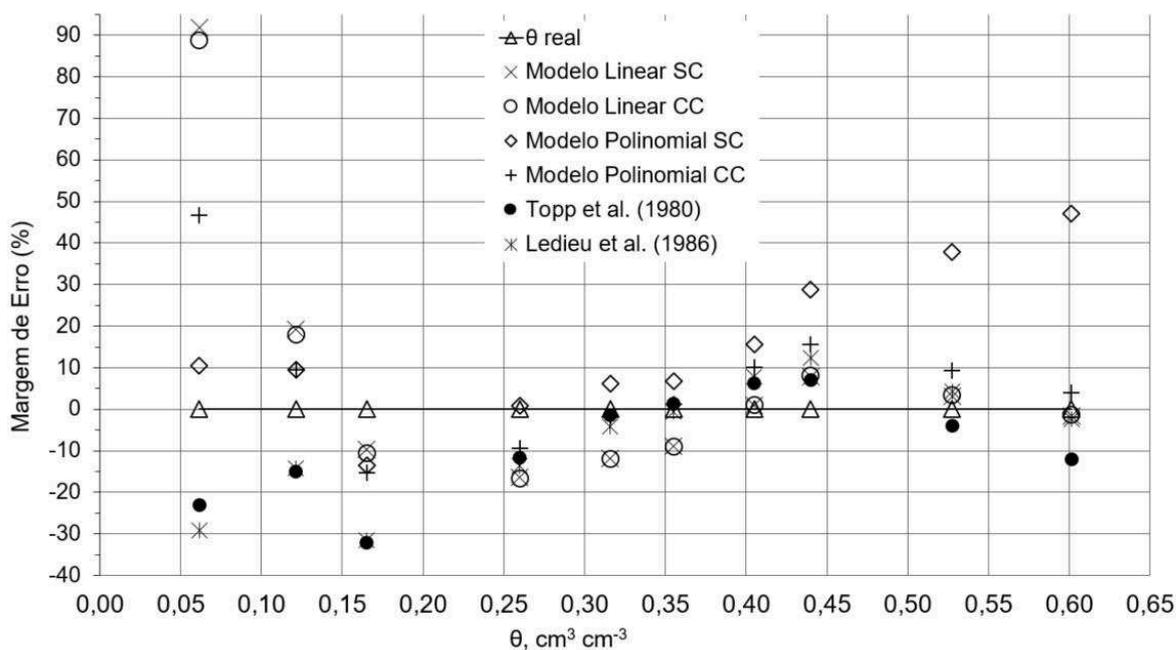
Figura 8 - Comparação entre as equações de regressão sem condição de contorno e modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), ambos em relação a umidade volumétrica real (θ_R) das amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A equação polinomial apresentou melhor R^2 do que a equação linear, sendo $R^2= 0,99$ e $R^2= 0,96$, respectivamente. A equação linear teve o mesmo comportamento do exemplo anterior, onde mesmo apresentando R^2 inferior, os valores de seus indicadores (SEE , EQM , EPM e $RQME$) foram mais precisos do que os apresentados pela equação polinomial (Tabela 3). O erro percentual em cada ponto foi nitidamente maior quando utilizada a equação polinomial, devido a sua propensão a superestimar valores de θ_E quando $\theta_R > 0,32 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, onde o erro percentual chegou a 47% para o ponto de saturação (quando a $\theta_R=0,60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Para a equação linear, a propensão foi de superestimar valores de θ_E quando $\theta_R < 0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, em condições de menor conteúdo de água (Figura 9, Figura 11).

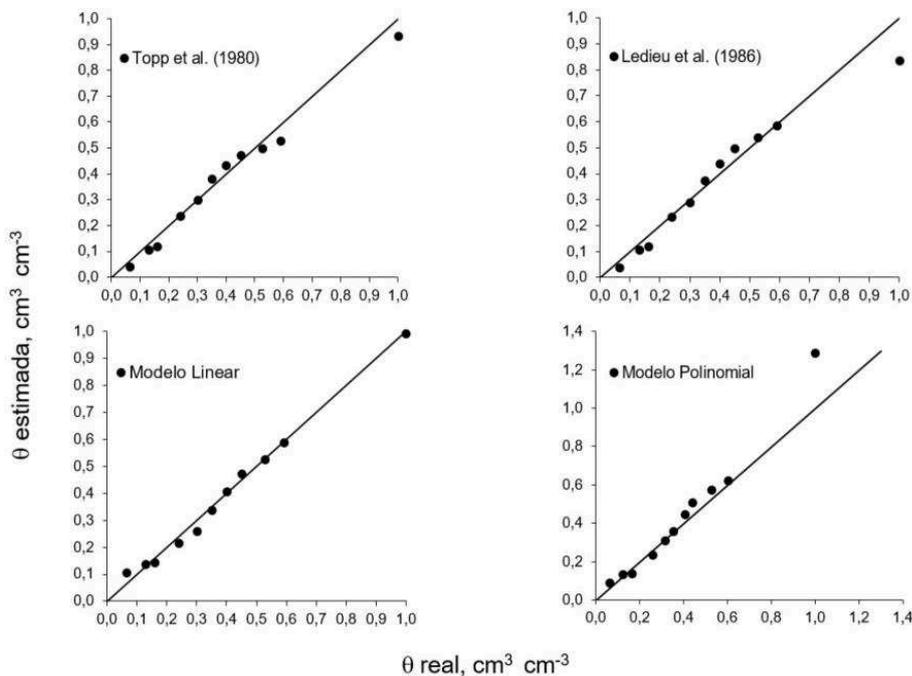
Figura 9 - Margem de erro percentual para cada ponto de θ_E em relação a θ_R , de acordo com a sua respectiva equação e uso ou não da condição de contorno.



SC – Sem condição de contorno; CC – Com condição de contorno.

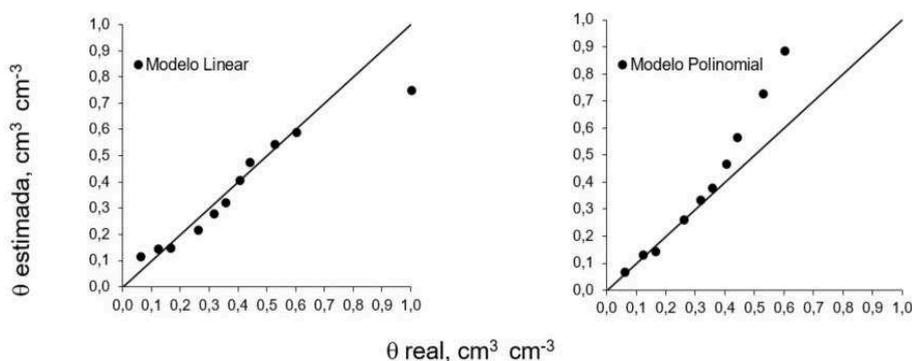
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Relação (gráfico 1:1) entre a θ_R e a θ_E dos modelos propostos por Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) e equações de regressão com condição de contorno.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 - Relação (gráfico 1:1) entre a θ_R e a θ_E das equações de regressão sem condição de contorno.

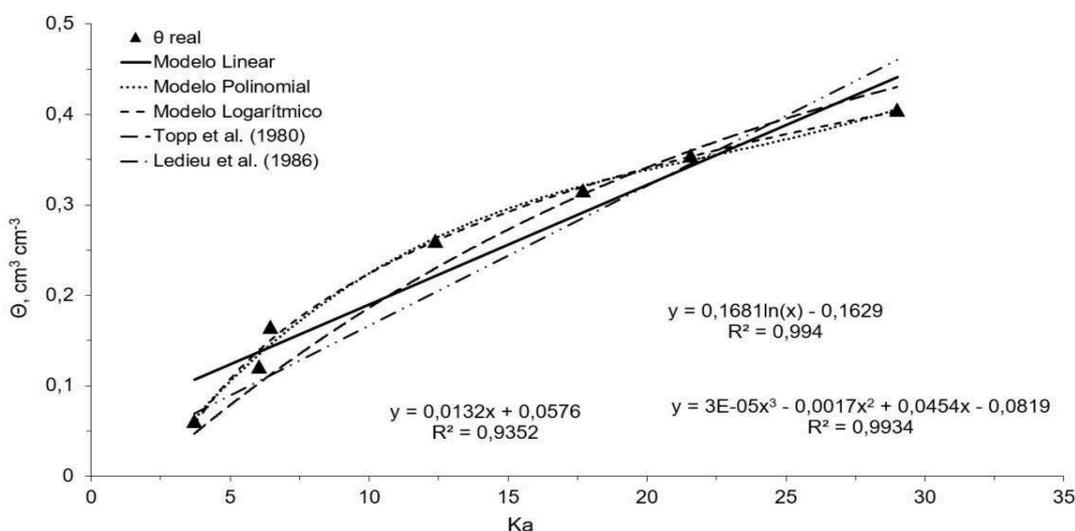


Fonte: Elaborado pelo autor

As equações de regressão baseadas em intervalos de umidade específica ($\theta_R < 0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) estão dispostas na Figura 12. O maior valor de R^2 foi relativamente proporcional aos demais indicadores de erro, ou seja, contrariando o comportamento das demais equações de regressão (com e sem condição de contorno), em que mesmo apresentando R^2 mais elevado, os demais indicadores remetiam a maior erro entre a θ_E e θ_R . A equação de regressão polinomial, gerada para este intervalo de

umidade reduzido, acarretou em melhores indicadores que as demais equações polinomiais obtidas (melhore *SEE* e *RQME*), porém superestimando valores de θ_E para $\theta_R > 0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. A equação de regressão linear (intervalo de umidade reduzido) foi plenamente inferior às demais (comparando entre as outras equações lineares), sendo a mesma pouco precisa, apresentando indicadores (R^2 , *SEE*, *EPM* e *RQME*) com maior grau de erro que as demais (Figura 13, Figura 14, Tabela 4)

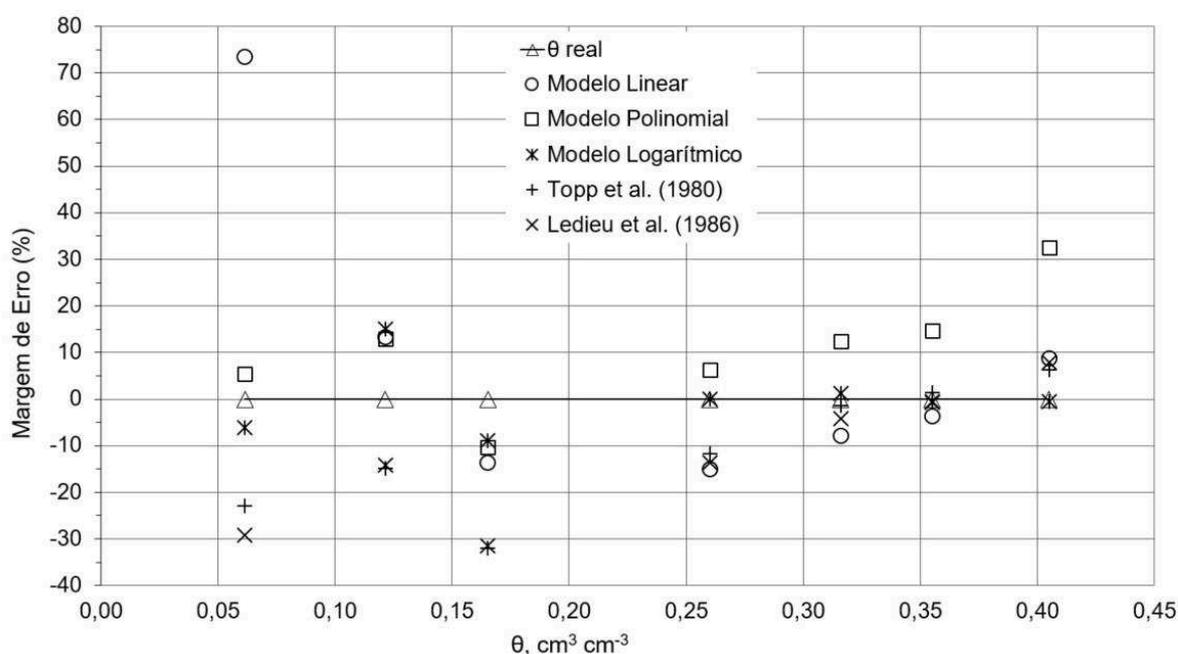
Figura 12 - Comparação entre as equações de regressão e os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986), ambos em relação à umidade volumétrica real (θ_R) para faixas de umidade específicas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A equação que melhor se ajustou aos pontos de θ_R foi a equação logarítmica, devido a curvatura característica deste tipo de função, onde uma grande variação no valor de K_a (x da função) não tem a mesma resposta quanto ao conteúdo de θ_E , reduzindo o erro quando o conteúdo de $\theta_R < 0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, diferente das demais equações. Todos os indicadores (R^2 , *SEE*, *EQM*, *EPM* e *RQME*) apresentaram valores ótimos (R^2 mais próximo de 1 e os demais mais próximos de zero), o que garante concluir que esta equação apresenta elevada acurácia e boa precisão (Figura 13, Figura 14, Tabela 4).

Figura 13 - Margem de erro percentual para cada ponto de θ_E em relação a θ_R , para faixas de umidade volumétrica específica, de acordo com sua respectiva equação.



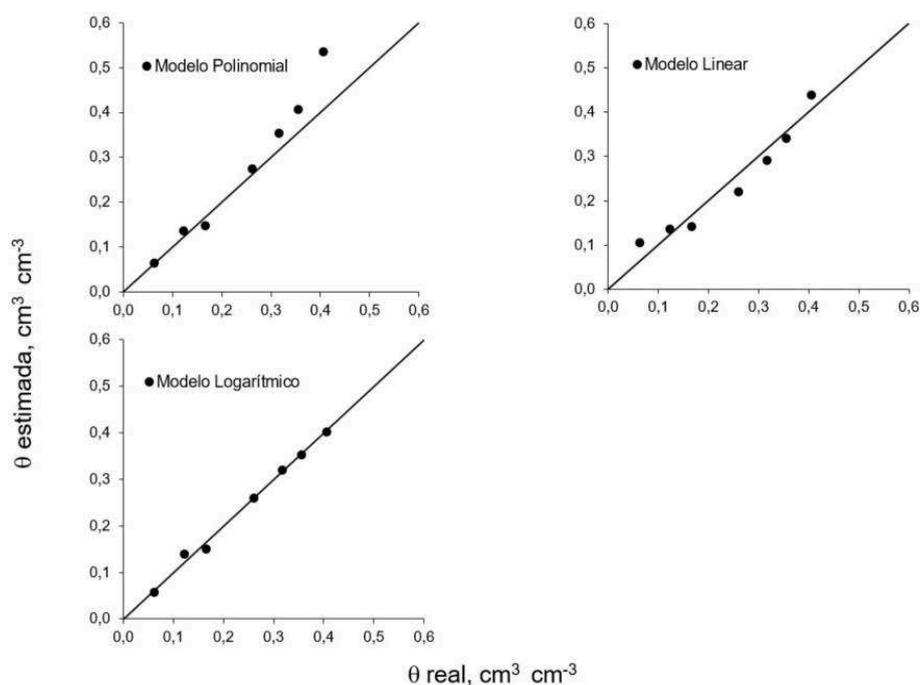
Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução do erro na determinação da θ_E , ao adotar a condição de contorno para todas as faixas de θ_R , corrobora as recomendações de Gubiani et al. (2015), onde a diferença entre a θ_E e a θ_R pode chegar a mais de $0,2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou 47% superior, no caso da não utilização da condição de contorno. O comportamento de K_a para conteúdo de água $< 0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ foi coincidente, em alguns quesitos, com o descrito por outros pesquisadores. Tomaselli & Bacchi (2001) relataram menor variação no K_a , em solos minerais de textura fina, quando $\theta_R < 0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Para solos orgânicos, Skierucha et al. (2012) também documentaram tal comportamento. Portanto, a influência da textura, óxidos de ferro e matéria orgânica tendem a influenciar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas do equipamento de TDR (ROBINSON et al., 1995; TOMASELLI & BACCHI, 2001; KAISER et al., 2010; SKIERUCHA et al., 2012).

A incapacidade de obter dados precisos das equações lineares, em faixas de $\theta_R < 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, deve-se aos grandes valores de SEE encontrados nesse intervalo (maior distanciamento entre o valor real e seu valor estimado, não do valor médio da reta), o que leva a crer que esse tipo de equação não consegue fornecer dados confiáveis para baixo conteúdo de água no solo. A equação polinomial sem condição de

contorno e para intervalo de umidade específico apresenta boa precisão ao determinar a θ_E quando $\theta_R < 0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Figura 14 - Relação (gráfico 1:1) entre a θ_R e a θ_E das equações de regressão para faixas de umidade volumétrica real (θ_R) específicas.



Fonte: Elaborado pelo autor

A equação que apresentou melhores indicadores na faixa de $\theta_R \leq 0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ foi a logarítmica, devido ao valor de R^2 ser o mais próximo de 1 (um) e o valor de SEE, EQM, EPM e RQME ser o mais próximo de zero, pode-se constatar que tal equação fornece menor número de erros e grande acurácia. Mesmo buscando abranger valores de θ_R próximos a saturação, tal condição é pouco usual. A adoção de equações que busquem abranger todos os pontos de θ_R acaba por fornecer grande erro para θ_E . A equação logarítmica apresentou boa estimativa até mesmo para o conteúdo de $0,44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (fora da faixa de θ_R e K_a utilizada para confecção da regressão).

A equação logarítmica, que representa a calibração para a condição de Latossolo Vermelho estudada, é $f(x) = 0,1681 \ln(x) - 0,1629$.

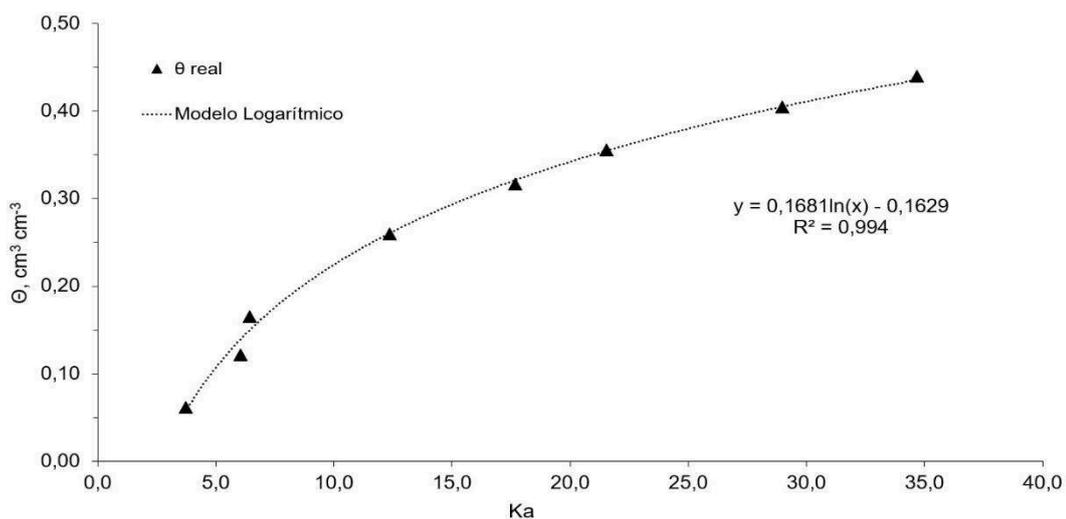
Tabela 4 - Análise estatística dos modelos de determinação da curva de calibração para obtenção da umidade volumétrica estimada (θ_E) utilizando faixas de umidade volumétrica real (θ_R) específicas.

Modelos	Parâmetros estimados			Coef. Li- near	R ²	SEE ⁽¹⁾	EQM ⁽²⁾	EPM ⁽³⁾	RQME ⁽⁴⁾
	Ka	Ka ²	Ka ³						
Polinomial	0,0454	0,0017	3E-05	0,0819	0,9934	0,067	0,0032	-10,602	0,057
Linear	0,0132	-	-	0,0576	0,9352	0,036	0,0009	-7,901	0,030
Logarítmico	0,1681	-	-	0,1629	0,9940	0,011	0,0001	-0,045	0,009
Topp et al. (1980)	0,029	5,5E-04	4E-06	0,0530	-	0,031	0,0011	10,761	0,027
Ledieu et al. (1986)	0,1138	-	-	0,1758	-	0,034	0,0012	12,210	0,029

(¹) Erro padrão da estimativa; (²) Erro quadrático médio; (³) Erro percentual médio; (⁴) Raiz do quadrado médio do erro.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Equação de determinação da θ_E para Latossolo Vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÕES

O modelo considerados “universais”, propostos por Topp et al. (1980) e de Ledieu et al. (1986) não são adequados para estimar a umidade volumétrica para o solo estudado.

As equações lineares (CC e SC) e equação logarítmica apresentaram melhor eficiência que as consideradas “universais”.

A equação de determinação da θ_E que apresentou melhor acurácia e ótima precisão foi: $f(x) = 0,1681 \ln(x) - 0,1629$, quando $K_a \leq 34,7$.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502**. Esta Norma define os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra. Rio de Janeiro/RJ, Set/1995. Disponível em: <<https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/nbr-6502-rochas-1.docx>>. Acesso em: 14 de maio de 2017.

BRAGA, M. B.; MAROUELLI, W. A.; CALGARO, M. Adaptação e avaliação de procedimento simplificado para determinação da umidade do solo para fins de irrigação de hortaliças. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 23, 2013, Luís Eduardo Magalhães, BA. Evolução e tecnologia na irrigação: **Anais**. Brasília, DF: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2013. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/971044/1/0034IRRI20809.pdf>>. Acesso em: 08 de junho de 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife, Convênio MA/DRNR, 1973. 431p. (Boletim Técnico). Disponível em: <http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i00003061_001.pdf/>. Acesso em: 14 de maio de 2017.

CALBO, A. G. Estado da água no solo e na planta. In: CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C. **Sistema Irrigas para manejo de irrigação**: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos. Brasília: Embrapa Hortaliças. p. 95-102, 2005. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/779586/1/sistemairrigas.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2017.

CHANASYK, D. D.; NAETH, M.A. Field measurement of soil moisture using neutron probes. **Canadian Journal of Soil Science**, ed. 76: p.317-323. 1996. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.4141/cjss96-038#.WhiFT0qnGUi>>. Acesso em: 11 de julho de 2017.

CORREA, M. M. et al. Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1017-1031, Junho, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000300011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 27 de abril de 2017.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. revista (online) – Rio de Janeiro, 2011. 230p. Disponível em <<http://www.cnpq.embrapa.br/publicacoes/>>. Acesso em: 02 de junho de 2017.

FAO. **AQUASTAT**. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. 2010 Disponível em : <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html?regionQuery=false&showCodes=true&yearRange.fromYear=1960&yearRange.toYear=2015&var-GrpIds=4250,4251,4252,4253,4254,4255,4256,4257,4260,4261,4262,4263,4264,4265,4269,4270,4275,4451,4475,4490,4491,4493,4510,4512,4515,4516,4517,4535&cnt>>

Ids=21&newestOnly=false&showValueYears=true&categoryIds=-1&XAxis=YEAR&query_type=CP&YAxis=VARIABLE&hideEmptyRowsColumns=true >. Acesso em: 21 de março de 2017.

FAOSTAT. **População da base de dados**. Site da web. Disponível em: <www.fao.org/faostat/en/#data/OA>. Acesso em: 20 de março de 2017

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 487-493, Sept. 2000 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832000000300002&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 21 de outubro de 2017.

GREENWOOD, K.L. & MCKENZIE, B.M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: A review. **Austr. J. Exper. Agric.**, 41:1231-1250, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/262957551_Grazing_effects_on_soil_physical_properties_and_the_consequences_for_pastures_A_review>. Acesso em: 19 de julho de 2017.

GUBIANI, P. I. et al. Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no solo. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 8, p. 1412-1417, Ago. 2015 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782015000801412&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 de junho de 2017.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257004186_Soil_compaction_in_cropping_systems_A_review_of_the_nature_causes_and_possible_solutions>. Acesso em: 16 de agosto de 2017.

IORI, P. et al. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1448-1456, Nov. 2012 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000500008&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 02 de abril de 2017.

KAISER, D. R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 649-658, Junho 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000300006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 02 de abril de 2017.

KHAN, S. HAMRA, R.A. UM, J. *Water management and crop production for food security in china: a review*. **Agricultural water management**, 96 (3):2009, 349-360. 2009. Disponível em: <http://bwl.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/lehrstuhl_ind_en_uw/lehre/ss11/Sem_Yuri/Agr-water.pdf>. Acesso em: 19 de agosto de 2017.

KHLEBNIKOVA, E. I. *Classification of the climate of the Earth*. In: **Environmental structure and function: climate system** - vol. 1: *climate system*. St. Petersburg: Eo- lss, 2009. P. 229-245 Disponível em: <http://https://books.google.com.br/books?id=t6qkCwAAQBAJ&pg=PA268&dq=&hlpt-BR&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 30 mar. 2017.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, p. 365-371, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782008000200011&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 19 de agosto de 2017.

LEDIEU, J.; RIDDER, P.; CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time domain reflectometry. **J. Hydrol**, 88:319-328, 1986. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169486900971>>. Acesso em: 18 de agosto de 2017.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2011. 456 pg.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modelling crop growth: *movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction*. **Soil & Tillage Research**. 73, 15–29, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/223884599_Review_of_modelling_crop_growth_movement_of_water_and_chemicals_in_relation_to_topsoil_and_subsoil_compaction?ev=prf_high>. Acesso em: 10 de julho de 2017.

MANCUSO, M. A. et al. Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v. 14, n.1, Edição Especial p. 2890–2998, fev, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/10932>>. Acesso em: 20 de setembro de 2017.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. [tradução de Cláudia F. Falluh, Balduino Ferreira]. – São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: NEAD, 2010. 568p. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/pgdr/publicacoes/producaotextual/lovois-de-andrade-miguel-1/mazoyer-m-roudart-l-historia-das-agriculturas-no-mundo-do-neolitico-a-crise-contemporanea-brasilia-nead-mda-sao-paulo-editora-unesp-2010-568-p-il>>. Acesso em: 14 de maio de 2017.

NETO, M. D. de A. Métodos De Medição Da Água No Solo: uma breve discussão. **Revista Geonomos**, [S.l.], dez. 1994. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geonomos/article/view/226>>. Acesso em: 27 de abril de 2017.

PUMPANEN, J.; ILVESNIEMI, H. Calibration of time domain reflectometry for forest soil humus layers. **Boreal Environment Research** 10: p.589-595. Helsinki, 14 de dezembro de 2005. Disponível em: <<http://www.borenv.net/BER/pdfs/ber10/ber10-589.pdf>>. Acesso em: 29 de julho de 2017.

REICHARDT, K; TIMM, L. **Solo, planta e atmosfera** – 2. ed. – Barueri, SP: Manole, 2012. 500p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos e Mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**. Vol. 1, Viçosa, p. 49-134, 2007. Disponível em: <http://fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/2007_Topicos.pdf>. Acesso em: 13 de outubro de 2017.

ROBINSON, D. A.; BELL, J. P.; BATCHELOR, C. H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. **Simpósio: Time Domain Reflectometry Applications in Soil Science** held at the Research Centre Foulum, *September 16, 1994* (Tjele, Denmark: Danish Institute of Plant and Soil Science, 1994), pp. 63-70, SP report no. 11, Volume 3, Jun., 1995. Disponível em: <<http://pe2bz.philpem.me.uk/Comm01/-%20TestEquip/-%20TDR/Info-907-Theory/SoilMoist-04/titan.html>>. Acesso em: 20 de setembro de 2017.

RUIZ, H. A.; SARLI, G. O.; SCHAEFE, C. E. G. R.; FILGUEIRA, R. R.; SOUZA, F. S. de. La superficie específica de oxisoles y su relación con la retención hídrica. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias**, 48. 2016. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382847506009>> ISSN 0370-4661. Acesso em: 24 de agosto de 2017.

SANTOS, G. A. et al. Matéria Orgânica e Qualidade do Solo. 2. ed. In: VEZZANI, F. M. et al. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo**. Metrópole Editora LTDA, 2008. Pg. 483-493.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa Solos, 353 pg, 2013.

SEVERIANO, E. da C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II -quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 414-423, Jun, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162010000300006&script=sci_abstract&lng=pt>. Acesso em: 14 de outubro de 2017.

SKIERUCHA, W. et al. A tdr-based soil moisture monitoring system with simultaneous measurement of soil temperature and electrical conductivity. **Sensors** (Basel, Switzerland), 12(10), p.13545–13566, outubro/2012. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23202009>>. Acesso em: 15 de abril de 2017.

SONCELA, R. et al. *Construction and calibration of TDR probes for volumetric water content estimation in a Distroferric Red Latosol*. **Eng. Agríc.** Jaboticabal, v. 33, n. 5, p. 919-928, Out. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162013000500004&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 28 de abril de 2017.

TOMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. **Pesq. Agropec. Bras.**, 36:1145-1154, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2001000900008>. Acesso em: 15 de julho de 2017.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. *Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines*. **Water Resources Research**, Volume 16, Issue 3, p. 574-582, 1980. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228078216_Electromagnetic_Determination_of_Soil_Water_Content_Measurements_in_Coaxial_Transmission_Lines>. Acesso em: 24 de abril de 2017.

VENDRAME, P. R. S.; EBERHARDT, D. N.; BRITO, O. R.; MARCHAO, R. L.; QUANTIN, C.; BECQUER, T. Formas de ferro e alumínio e suas relações com textura, mineralogia e carbono orgânico em Latossolos do Cerrado. **Seminário: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, suplemento 1, p. 1657-1666, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270747202_Formas_de_ferro_e_aluminio_e_suas_relacoes_com_textura_mineralogia_e_carbono_organico_em_Latossolos_do_Cerrado>. Acesso em: 24 de junho de 2017.