

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RENATA CRISTIANE PEREIRA

Ajustes de modelos de calibração da TDR em amostras deformadas e indeformadas, obtidas a partir de solo sob diferentes sistemas de manejo

Maringá

2018

RENATA CRISTIANE PEREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves.

Maringá

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) (Biblioteca  
Central - UEM, Maringá – PR, Brasil)

P436a Pereira, Renata Cristiane  
Ajustes de modelos de calibração da TDR em amostras deformadas e indeformadas, obtidas a partir de solo sob diferentes sistemas de manejo / Renata Cristiane Pereira. -- Maringá, PR, 2018.  
x, 63 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2018.

1. Umidade do solo - Métodos e determinação. 2. Solos - Calibração. 3. Solos - Regressão. I. Gonçalves, Antonio Carlos Andrade, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDD 23.ed. 631.4

Márcia Regina Paiva de Brito – CRB-9/1267

# FOLHA DE APROVAÇÃO

RENATA CRISTIANE PEREIRA

Ajustes de modelos de calibração da TDR em amostras deformadas e indeformadas, obtidas a partir de solo sob diferentes sistemas de manejo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

## COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Diogo Francisco Rossoni  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Roberto Rezende  
Universidade Estadual de Maringá

Aprovada em: 28 de fevereiro de 2018.

Local de defesa: Sala 16, Bloco J45, *campus* da Universidade Estadual de Maringá.

## DEDICATÓRIA

Dedico

Aos meus pais Helena e Sebastião  
Jorge, a minha irmã Ana Cristina, e  
a todos meus professores.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por estar presente em todos os momentos de dificuldades de minha vida;

Ao prof. Orientador, Dr. Antonio Carlos Andrade Gonçalves, pelo apoio, orientação e dedicação durante todo o trabalho;

À toda minha família, pela paciência em todos os momentos, em especial a meus pais Helena e Sebastião Jorge pelo amor e compreensão;

Ao professor Dr. Telmo Antônio Tonin, pelos conselhos e incentivo;

Aos professores do curso de Pós-Graduação,

Aos amigos e colegas de Pós-Graduação, pela amizade e convívio;

Ao Engenheiro Agrônomo Dr. Anderson Takashi Hara, pela amizade e colaboração durante o trabalho;

À Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Agronomia, pela oportunidade de realização deste curso;

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

## EPÍGRAFE

"Por isso vos digo que todas as coisas  
que pedires em oração, crede receber,  
e tê-las-eis."

Marcos 11: 24.

Ajustes de modelos de calibração da TDR em amostras deformadas e indeformadas, obtidas a partir de solo sob diferentes sistemas de manejo

## RESUMO

A determinação da umidade do solo no domínio espaço-temporal é essencial para que se possa manejar, de forma eficiente a água no solo, em um sistema de produção vegetal. Em vista disto, diversos métodos foram desenvolvidos para se proceder a esta determinação. Com características favoráveis e com limitações, cada um deles permite, com algum nível de qualidade, determinar a umidade volumétrica do solo. A técnica da TDR “Time domain reflectometry” é um método não destrutivo, de fácil operação e que apresenta potencial para se obter um excelente resultado. No entanto, características locais do solo podem influenciar de maneira específica na curva de calibração do mesmo, fazendo com que um modelo universal não seja adequado para utilização. Portanto, calibrações locais são necessárias. Além disto, para um mesmo solo, empregar amostras deformadas ou não deformadas pode mudar o modelo de calibração, além de que variáveis do solo que expressam sua condição estrutural podem incrementar a qualidade do modelo de calibração. Em função disto, o trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar os modelos de calibração obtidos utilizando sondas originais (So) e de sondas construídas artesanalmente (Sa), em um NITOSSOLO VERMELHO distroférico da região noroeste do estado do Paraná. Foram obtidas curvas com amostras não deformadas a partir de duas condições de manejo, solo cultivado (SC), com preparo convencional e solo sob mata (SM), ambos com mais de trinta anos. Os resultados permitiram constatar que as sondas artesanais podem ser empregadas sem restrição. Os dois ambientes correspondentes aos sistemas de manejo conduziram a dois modelos de calibração diferentes, porém em uma magnitude que, para fins práticos de manejo de água no solo, podem ser expressos por um modelo geral. Este, no entanto, apresentou-se com uma grande diferença em relação ao obtido a partir de amostras deformadas de solo, o que torna o modelo obtido em terra fina seca ao ar (TFSA) menos adequado para estimativas de umidade no campo. Verificou-se que o modelo proposto por Topp et al.,(1980) assemelha-se ao obtido para amostras deformadas, sendo, portanto, menos adequado para emprego nas condições de campo. A incorporação da densidade do solo ao modelo não aprimorou a qualidade do mesmo e a incorporação do ponto referente à água pura ao conjunto dos valores experimentais não melhorou o modelo de calibração.

**Palavras-chave:** umidade do solo, calibração, regressão.



TDR calibration models fitting on disturbed and undisturbed samples, from soil under some management systems

**ABSTRACT**

The soil water content evaluation at a particular time and in a certain position of the space is essential to efficiently manage this natural resource within a crop production system. Thus, several methods have been developed to proceed with this determination. With favorable characteristics and limitations, each of these methods allows to determine soils volumetric moisture with a certain level of quality. The *TDR* technique is a nondestructive method easy to operate and that has potential for excellent results. However, local soil characteristics may influence the soil calibration curve in a specific manner, which makes that a universal model not suitable for use. Therefore, local calibrations are needed. Furthermore, for a same soil, the fact of using deformed and non-deformed soil samples may change the model of calibration. Apart from that, variables that express soil structural condition may increase the quality of the calibration model. Therefore, the present work was carried with the propose of evaluating the calibration models of a dystroferric red ultisol of the northwest region of Parana state, using original (Op) and artisanal (Ap) probes. Two curves were obtained in non-deformed samples from two land use managements, one was a cropped soil (CS) in conventional system and the other was a forest soil, both with more than 30 years of management. Without any restriction, the results found allowed to verify that artisanal probes might be employed during the utilization of the *TDR*. The both environments corresponding to the soil management systems led to two different calibration models, but in a magnitude that, for practical purposes of soil water management, may be represented by one general model. This model, however, showed a considerable difference compared to the results obtained from deformed soil samples, which, thus, makes the model obtained using the air-dry fine earthless suitable to estimate soil moisture. It was found that the model proposed by Topp et al.,(1980) is very close to that obtained from deformed samples and it is less adequate to be employed in field conditions. In such circumstances, while the inclusion of the soil density into the model did not enhance its quality, the inclusion of the point regarding the pure water to the set of experimental values was not effective to promote any improvement in the calibration model.

**Keywords:** soil moisture, calibration, linear regression.

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Coeficientes do modelo de Gonçalves et al. (2011) entre umidade com base em volume ( $\theta$ ) e constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) e densidade do solo ( $D_s$ )..... 25
- Tabela 2 – Estatística descritiva dos valores das variáveis medidas, para todo o conjunto de dados obtidos com solo de mata e solo cultivado: constante dielétrica ( $K_a$  – adimensional), umidade base volume ( $\Theta - m^3m^{-3}$ ). Umidade base massa ( $u - MgMg^{-1}$ ) e densidade do solo ( $d_s - Mgm^{-3}$ )..... 29
- Tabela 3 – Estatística descritiva dos valores das variáveis medidas, para todo o conjunto de dados obtidos com TFSA: constante dielétrica ( $K_a$  – adimensional), umidade base volume ( $\Theta - m^3m^{-3}$ ). Umidade base massa ( $u - MgMg^{-1}$ ) e densidade do solo ( $d_s - Mgm^{-3}$ )  
37
- Tabela 4 – Coeficientes dos modelos completos ajustados ( $\Theta = a + bK_a + cK_a^2 + dK_a^3$ ) e correspondente coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os conjuntos de dados estudados e coeficientes do modelo de Topp et al.,(1980) para comparação 46
- Tabela 5 – Coeficientes do modelo geral:  $a + b(d_s) + c(K_a) + d(d_sK_a) + e(K_a^2) + f(d_sK_a^2)$  ajustado ao conjunto de dados obtidos em campo, para a calibração da TDR com incorporação do efeito da densidade do solo..... 50

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Sonda para uso com o equipamento de TDR, construída artesanalmente, mostrando os componentes empregados .....20
- Figura 2 – Obtenção de amostra indeformada de solo sob cultivo por meio da inserção com atuação hidráulica do microlisímetro, e posterior remoção do conjunto .....21
- Figura 3 – Obtenção de amostra indeformada de solo sob mata por meio da inserção com atuação hidráulica do microlisímetro, e posterior remoção do conjunto ..... 22
- Figura 4 – Amostras indeformadas de solo sob cultivo e sob mata e sondas artesanais e originais instaladas no seu interior, para leitura de  $K_a$  com o TDR .....23
- Figura 5 – Valores de umidade gravimétrica do solo nos três conjuntos avaliados: material deformado, em Laboratório (TFSA), amostras não deformadas de Solo Cultivado (Solo C) e de Solo sob Mata (Solo M), ao longo do tempo, segundo o processo de secagem..... 30
- Figura 6 – Valores de umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica do material para todo o conjunto de dados, incluindo sondas originais e artesanais.....33
- Figura 7 - Valores de umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica do material para o conjunto de dados referentes às sondas originais .....34
- Figura 8 - Valores de umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica do material para o conjunto de dados referentes às sondas artesanais..... 35
- Figura 9 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração .....38
- Figura 10 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas originais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração .....40

Figura 11 – Umidade gravimétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração.....	41
Figura 12 – Umidade gravimétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas originais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração.....	42
Figura 13 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA, modelos ajustados para as curvas de calibração e modelo de Topp et al.,(1980) .	43
Figura 14 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA, modelos ajustados para as curvas de calibração, modelo de Topp et al. (1980) e modelos completos (incluindo ponto referente à água).....	46
Figura 15 – Análise dos resíduos gerados pelo modelo de segundo grau em comparação com os do modelo completo (incluindo ponto teórico referente à água).....	47
Figura 16 – Valores medidos e estimados de umidade volumétrica do solo, com o emprego do modelo quadrático incompleto e com o modelo incorporando a densidade do solo (ds).....	50
Figura 17 – Valores estimados por ambos os modelos, sem e com a incorporação da ds.....	51

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Avaliação da umidade do solo.....	5
2.2 A técnica da <i>TDR</i> “Time Domain Reflectometry.....	7
2.2.1 Generalidades .....	7
2.2.2 Princípio de funcionamento.....	8
2.2.3 Modelos de curva de calibração .....	10
2.2.4 Confeção de sondas: processos industrial e artesanal.....	12
2.2.5 Incorporação da densidade do solo no modelo de calibração.....	15
2.2.6 Características físicas do solo e emprego de <i>TDR</i> .....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	19
3.1 Processos de construção das sondas artesanais .....	20
3.2 Preparo dos microlisímetros e obtenção de amostras .....	21
3.3 Tratamento dos dados obtidos .....	23
3.4 Processo de secagem .....	24
3.5 Ajustes de modelos de regressão linear .....	24
3.6 Comparação com modelo de Topp e ajuste de modelo de terceiro grau completo .....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1 Análise descritiva dos dados.....	28

4.2 Processo de secagem .....	30
4.3 Modelos de calibração para dados em conjunto .....	32
4.4 Modelos individualizados.....	36
4.5 Comparação com o modelo proposto por Topp et al (1980).....	43
4.6 Ajuste de modelos completos, incluindo leitura em água .....	44
4.7 Incorporação da densidade do solo ao modelo de calibração.....	48
5 CONCLUSÕES .....	52
6 REFERÊNCIAS .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para diversas atividades humanas, em especial para os sistemas de produção vegetal. Diversos setores são dependentes da utilização da água, destacando-se o abastecimento em geral, a indústria, a produção de energia elétrica e a agricultura. O monitoramento de água no solo tem sido fundamental para definir o manejo adequado a ser adotado em sistemas agrícolas. A disponibilidade de água no solo pode ser afetada por diversos fatores. Dentre os mais relevantes destacam-se as alterações no teor de matéria orgânica, densidade do solo, macroporosidade e sistema de cultivo empregado. Para se estabelecer um manejo adequado do recurso hídrico em sistemas de produção vegetal, é essencial que se possa avaliar, adequadamente, o conteúdo de água do solo, em diferentes posições e ao longo do tempo. Isto demanda muito esforço e exige o desenvolvimento de técnicas adequadas. Dentre os vários métodos desenvolvidos ao longo do tempo para a avaliação da umidade do solo, a técnica da *TDR* (Time Domain Reflectometry) tem sido uma ferramenta largamente empregada, em função das suas características favoráveis. Dentre estas se incluem o fato de ser um método não destrutivo do solo, possibilitando repetições de medidas na mesma posição, ao longo do tempo. Também se destaca a facilidade operacional do processo de medida. No entanto, esta técnica apresenta importantes limitações, principalmente aquelas associadas ao elevado custo do equipamento e das sondas comercializadas, restringindo a sua aplicação em campo. Também é limitante o fato de que, ao contrário do que se propunha inicialmente, quando a técnica começou a ser desenvolvida, havia um modelo de calibração universal para ser empregado em qualquer solo. A exigência de calibrações locais é necessária, para que se possa, a partir das leituras de constante dielétrica ( $K_a$ ) efetuadas, obter a correspondente umidade volumétrica do solo ( $\Theta$ ). Questões relacionadas ao elevado custo do equipamento têm sido contornadas com a construção artesanal de sondas, tornando-as mais baratas. No entanto, a qualidade destas sondas, assim produzidas, deve ser avaliada localmente e curvas de calibração devem ser obtidas com o seu emprego, de forma a se assegurar a qualidade da estimativa de umidade realizada. O ajuste do modelo de calibração, em qualquer circunstância, pode ser feito por meio de modelos empíricos polinomiais de grau um, dois ou três, conforme o caso. Porém, diversas características do solo podem exercer influência sobre a curva de calibração, reafirmando a necessidade de calibração local. Além disto, a incorporação de uma variável que expressa a condição estrutural do solo, como a densidade do solo ( $d_s$ ) tem sido empregada com bons resultados. Mesmo em um determinado solo, as diferentes

estratégias de manejo a que ele está submetido podem afetar de maneira marcante os mecanismos de interação solo-água, o que pode afetar a relação entre a constante dielétrica medida por meio da TDR e a correspondente umidade volumétrica do solo. Assim, diferentes sistemas de manejo do solo podem implicar na necessidade de diferentes curvas de calibração para a *TDR*.

Este trabalho tem como hipóteses:

- 1 – É possível utilizar sondas construídas artesanalmente para avaliação da umidade do solo em diferentes ambientes, desde que a calibração local seja feita;
- 2 – Sistemas de manejo diferentes em um mesmo solo podem levar a diferentes curvas de calibração para a *TDR*;
- 3 – Um modelo de calibração obtido a partir de amostras alteradas de um mesmo solo pode ser empregado para utilização em condições de campo;
- 4 – O modelo de Topp et al.,(1980) não é adequado para descrever a relação entre constante dielétrica e umidade do solo, nos ambientes estudados. Calibração local é necessária;
- 5 – A incorporação da densidade do solo ao modelo pode incrementar a qualidade da estimativa realizada;
- 6 – A construção de um modelo com a inclusão do ponto referente à água pode incrementar a qualidade da estimativa realizada.

## OBJETIVOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos:

- Avaliar a qualidade de sondas de *TDR* construídas artesanalmente, por meio da comparação do desempenho destas com o das sondas originais, em diferentes meios;



- Avaliar o efeito do sistema de manejo do solo, mata e cultivo, sobre o funcionamento da *TDR*, em termos da sua curva de calibração;
- Avaliar comparativamente, os modelos ajustados para os dados obtidos nos dois ambientes: solo sob mata e solo sob cultivo;
- Avaliar a qualidade de um modelo ajustado em laboratório, a partir de amostras deformadas, para a realização de estimativas da umidade em condição de campo;
- Avaliar se o emprego da umidade gravimétrica na curva de calibração pode viabilizar a utilização de um modelo mais geral, para os diferentes ambientes;
- Avaliar a qualidade do modelo de Topp et al., (1980) para descrever as curvas obtidas nos diferentes ambientes avaliados;
- Avaliar se a inclusão do ponto referente à água pura junto aos dados experimentais pode melhorar a qualidade do ajuste do modelo para a curva de calibração;
- Avaliar se a incorporação da densidade do solo ao modelo pode melhorar a qualidade da estimativa da umidade do solo, nas condições estudadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O monitoramento de água no solo é fundamental para definir o manejo adequado a ser adotado. Como a água presente no solo não está, em sua totalidade, disponível para as plantas, faz-se necessário compreender a distribuição da mesma no solo. A disponibilidade de água no solo para as plantas pode ser afetada por diversos fatores. Dentre os mais relevantes destacam-se as alterações no teor de matéria orgânica, densidade do solo, distribuição de tamanhos e continuidade de poros e sistema de cultivo empregado (SILVA, et al., 2012; LIMA et al., 2007; LIMA et al., 2014; MEDEIROS et al., 2007).

A água disponível para as plantas está diretamente relacionada com a capacidade de armazenamento da mesma no solo. Deste modo, determinar o conteúdo volumétrico de água auxilia a compreensão de sua distribuição no perfil do solo, ou seja, ajuda a definir o volume de água que realmente será disponível as plantas (ASGARZADEH et al. 2014). A compreensão dos processos metabólicos que envolvem a água e as plantas no ambiente tem contribuído para o crescimento e desenvolvimento de diversas espécies. Estudos envolvendo estas questões são essenciais para o processo evolutivo das plantas (YAN, et al. 2017).

A umidade do solo é um conceito relativamente simples, mas a sua determinação demanda o estabelecimento de estratégias adequadas, variáveis conforme as necessidades. A técnica de TDR tem se tornado uma excelente opção para monitorar a umidade volumétrica e a condutividade hidráulica do solo, visto que, apresenta maior sensibilidade em medir a umidade local. Ao ser comparada com outras técnicas, a TDR tem apresentado vantagens como precisão e facilidade de manuseio (HOLUBEK; KORONTHALYOVA, 2017; SAKELLARIOU- MAKRANTONAKI, et al. 2016). Por outro lado, o emprego adequado desta técnica é essencial para a obtenção de medidas coerentes, uma vez que erros podem ser inseridos no processo de medida, com relativa facilidade. Resultados obtidos por Souza et al., (2013) permitiram constatar que medidas de umidade do solo realizadas com o TDR, em uma determinada condição experimental, superestimaram os valores reais.

A técnica da TDR pode ser empregada nos mais diversos solos, com potencial para obtenção de bons resultados. No entanto, as calibrações devem ser realizadas de maneira criteriosa, pois as curvas de calibração variam de acordo com as características inerentes a cada solo. As propriedades dos solos relacionadas à estrutura física e a propriedades químicas são

responsáveis por alterações nos valores referentes à umidade do mesmo (VAZ et al., 2004; SANTOS et al. 2010).

## **2.1. Avaliação da umidade do solo**

A compreensão da dinâmica da água no perfil do solo é de fundamental importância para estabelecer critérios para o manejo de água em sistemas agrícolas. Dentre outras questões, para se definir a época e a quantidade adequada de água a ser aplicada a um sistema, via irrigação, por exemplo, é necessário conhecer a sua disponibilidade no solo (SANTOS et al. 2013).

A determinação da umidade do solo é imprescindível para manejo da água em culturas irrigadas. Definir o método mais adequado para medir a umidade do solo depende de vários fatores, como custo do equipamento a ser utilizado, facilidade de manuseio, precisão da técnica entre outros. Os métodos que visam mensurar a umidade do solo são os mais variados possíveis e devem ser definidos de acordo a necessidade, em termos de precisão e de exatidão das medidas (MOUAZEN; AL-ASADIB, 2018)

Os métodos de medida de umidade do solo variam e podem ser definidos como métodos diretos e métodos indiretos. O principal método direto para medir a umidade é o método gravimétrico, no qual medidas de massa de água e de sólidos são realizadas e a umidade gravimétrica é definida como a proporção entre elas.

O método gravimétrico é considerado destrutivo e demorado e, ao ser comparado a outras metodologias, apresenta a desvantagem de ser conduzido de forma localizada (DOBRIYAL et al., 2012; EMBRAPA, 1997). Além desta metodologia, outra técnica semelhante tem sido empregada para determinar a umidade do solo, o método do forno micro-ondas. Esta metodologia é fundamentada na relação entre a radiação eletromagnética e a temperatura da água (OLIVEIRA; ROQUE, 2016). Isto permite a remoção da água da amostra, por vaporização e a determinação da umidade por meio da relação entre massas de água que deixou a amostra e de sólidos presentes nesta.

As medidas de umidade baseadas na utilização do tensiômetro consideram o potencial matricial de água no solo. Sua utilização consiste na interação entre a solução do solo e água contida no equipamento pois esta solução, ao entrar em contato com a capsula porosa, exerce uma tensão e conseqüentemente uma sucção sobre o aparelho, submetendo a água no interior do mesmo a esta tensão, que corresponde ao potencial de água no solo. (COELHO et al., 2004;

EMBRAPA, 1999). A utilização de tensiômetros tem apresentado resultados satisfatórios, principalmente devido ao rápido tempo de resposta, manuseio simples e menores erros de medições. Outra vantagem desta metodologia é que não necessita de calibrações indiretas (TOLL et al., 2013).

Dentro dos métodos indiretos podem ser citados o método que utiliza a sonda de nêutrons, o método de resistência elétrica, utilizando blocos, a tomografia computadorizada com raio X, a ressonância magnética e o método da Reflectometria no Domínio do Tempo (*TDR*), conforme Trintinalha (2000). Também é relevante dentro dos métodos indiretos a *FDR* (Reflectometria no Domínio de Frequência).

O método *FDR* consiste em determinar a umidade do solo por meio de sondas de capacitância. Nestas, são utilizados capacitores, constituindo um meio dielétrico, cuja capacitância é modificada em função da proporção entre as três fases do meio poroso: solo, água e ar. A técnica *FDR* apresenta vantagens ao ser utilizada para determinar a água no solo, pois é considerada rápida, fácil de ser utilizada, a umidade pode ser medida diversas vezes, uma vez que se trata de um método não destrutivo e, além disto, apresenta baixo custo, ao ser comparada a técnica *TDR* (LINMAO et al. 2012, SOUZA et al., 2013; CALAMITA et al., 2012).

A sonda de nêutrons (Reflexão de nêutrons sobre o átomo de hidrogênio) baseia-se na emissão de nêutrons a partir de uma fonte. Esta metodologia é considerada uma técnica precisa, no entanto, sua utilização é afetada pelo volume, profundidade do solo e condições climáticas locais. Devido à radioatividade esta técnica apresenta restrições, e em razão da necessidade de fiscalização e cumprimento de normas de segurança, a sonda de neutros tem sido utilizada com menor frequência na determinação da umidade do solo (TEIXEIRA et al., 2005; TEIXEIRA et al., 2003).

Os blocos de resistência elétrica ou sensores alternativos tem se tornado uma opção viável em trabalhos de pesquisa. Esta metodologia se baseia na solubilização e movimentação dos eletrólitos, que posteriormente emitem respostas relacionadas com a umidade do solo. O princípio básico deste método consiste na passagem de corrente elétrica entre os eletrodos. As principais vantagens são a facilidade de fabricação dos sensores, custo relativamente baixo e a ampla faixa de resposta, no entanto esta técnica necessita de calibração individual e periódica (FREITAS et al. 2012; BATISTA, 2004).

O método *TDR* em comparação com as demais metodologias apresenta as vantagens de ser não destrutivo, possuir alta precisão, permite a leitura contínua em tempo real, não apresenta riscos de radioatividade e pode ser facilmente calibrado (CALDERÓN, 2010).

## **2.2. A técnica da TDR“Time Domain Reflectometry”**

### **2.2.1. Generalidades**

A Reflectometria no domínio do tempo (TDR) é considerada uma técnica eficiente para determinar a umidade existente no solo. Definida como um método indireto e não destrutivo, esta técnica apresenta vantagens como a rapidez, precisão e possibilidade de medições repetidas durante longos períodos (SOTO, et al. 2007; NUNES et al., 2015).

A TDR tem sido empregada em diversos trabalhos de pesquisa. Pesquisas de Elaiuy et al. (2009) e Souza et al. (2016a) avaliaram a determinação da umidade em diferentes substratos e obtiveram resultados adequados. Outros resultados de pesquisas mostraram que a técnica TDR pode ser eficiente em trabalhos relacionados à construção civil. Chen et al. (2012) obtiveram resultados positivos para medidas da constante dielétrica em aterros com resíduos sólidos. Suchorab et al. (2014); Izvolt et al. (2016); Cataldo et al. (2016) e Chung et al., (2013) desenvolveram trabalhos na área da construção civil e verificaram que a TDR pode ser eficiente em avaliações que relacionam a capacidade de absorção de materiais porosos. Zanetti et al. (2015), ao incorporarem as sondas de TDR em suas pesquisas obtiveram resultados significativos. Estes autores promoveram abordagens específicas ao relacionarem a umidade do solo, por meio de sistemas computacionais de rede neural artificial, com características físicas do solo. Souza et al. (2006b) relacionaram a condutividade elétrica medida pela técnica TDR e a concentração de  $\text{KNO}_3$ . Desde os anos 80, a relação entre as leituras de TDR e a concentração de íons na solução do solo tem sido objeto de estudos, com resultados relevantes.

A técnica TDR permite realizar medidas precisas do conteúdo volumétrico de água no solo, porém pode sofrer efeitos da temperatura ambiente. Trabalhos realizados com sondas de dissipação de calor em conjunto com a TDR indicaram que a ocorrência de mudança de temperatura acarreta em alterações da umidade no perfil do solo (LIU et al. 2011; REDER et al., 2014).

De acordo com trabalhos de pesquisa de SANT'ANA, et al. (2012), as medidas de  $K_a$  são alteradas conforme modifica-se o comprimento das hastes. Os resultados obtidos demonstraram que para valores de umidade acima de  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e abaixo de  $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  o comprimento das hastes interferem diretamente nos valores de  $K_a$ .

A qualidade da estimativa da umidade do solo utilizando-se sondas de TDR torna-se elevada quando o solo se encontra próximo da saturação. As medições de umidade, ao serem realizadas em solos mais secos, são mais propensas a erros. Isto ocorre também em decorrência do contato do solo com a sonda, pois, quanto mais próximo o solo estiver das sondas, maior será a qualidade da medida da umidade do solo (MOUAZEN, et al., 2018). Resultados semelhantes foram reportados por Walker et al. (2004), os quais identificaram que medidas de umidade do solo tornam-se imprecisas quando o solo encontra-se mais seco. Nesta condição, a constante dielétrica é reduzida em consequência de que a velocidade da onda eletromagnética se eleva, reduzindo o tempo de percurso.

A medida da umidade do solo por meio do TDR mesmo sendo uma das metodologias mais utilizadas apresenta algumas desvantagens, dentre as mais notáveis estão alto custo do equipamento, necessidade de calibração das sondas e a influência da composição química dos solos sobre as leituras (VAZ et al. 2004, JONES et al, 2002).

O equipamento TDR responsável pela leitura da constante dielétrica é constituído por um gerador de pulso, um osciloscópio capaz de capturar o pulso refletido, cabos coaxiais e a sonda. (SOUZA et al., 2016b).

### **2.2.2. Princípio de funcionamento**

A técnica TDR baseia-se na determinação da umidade do solo por meio da constante dielétrica do solo ( $K_a$ ). O contato do solo com as sondas provoca alterações das medidas da constante dielétrica. Medindo-se a velocidade de propagação de um pulso elétrico, quantifica-se a  $K_a$  do solo. Para a obtenção dessas medidas, hastes metálicas são inseridas no solo, de modo que, qualquer alteração na umidade do solo é detectada através de pulsos elétricos. A velocidade do pulso elétrico é inversamente proporcional aos valores de  $K_a$ , ou seja, conforme eleva-se a umidade do solo, os valores de  $K_a$  tornam-se maiores, decorrente de menores valores de velocidade do pulso ou maior tempo de percurso deste (CALDERÓN et al. 2010; JONES et al. 2002; MANIERI et al., 2007).

A constante dielétrica do solo apresenta diferentes valores que variam de acordo com a umidade e as características do solo. Os valores de  $K_a$  para a água são próximos de 80, para o ar os valores medidos estão em torno de 1, e para materiais inorgânicos e orgânicos, secos, os valores encontram-se entre 3 a 7. As medidas de  $K_a$  são afetadas diretamente ou indiretamente por alguns

fatores. Dentre os mais importantes destacam-se os minerais contidos no solo, efeito da temperatura, granulometria, comprimento do cabo coaxial, tipo de sonda utilizada e contato solo-sonda. (CALDERÓN et al. 2010; VAZ et al. 2004; TRINTINALHA et al., 2000).

A constante dielétrica é uma característica de materiais que são não condutores ou que são mal condutores de corrente elétrica. Estes materiais são denominados dielétricos. Cada material tem a sua permissividade elétrica ( $\epsilon$ ), a qual expressa a capacidade deste material de sofrer polarização em presença de um campo magnético. Por definição, a constante dielétrica (K) é a relação entre  $\epsilon$  e  $\epsilon_0$ , sendo este último a permissividade do vácuo. Para o sistema composto solo, o qual apresenta as três fases, sólidos, água e ar, define-se a constante dielétrica aparente deste meio ( $K_a$ ). (SOUZA et al., 2016b; BITTELLI et al., 2008).

A essência da aplicação da técnica da TDR consiste em se medir o tempo de deslocamento de um pulso eletromagnético, na frequência caracterizada como micro ondas, em uma sonda composta por, pelo menos, duas hastes metálicas, cujo comprimento (L) seja conhecido, introduzida no meio poroso. O equipamento deve emitir o pulso e registrar o tempo (t) necessário até ao seu retorno, após percorrer todo o comprimento da haste (Cerny, 2009). Assim, a relação entre a constante dielétrica do meio ( $K_a$ ) relaciona-se com estas variáveis por meio da equação 1:

$$K_a = \left(\frac{Ct}{2L}\right)^2 \quad (1)$$

$K_a$ = constante dielétrica (adimensional)

T= tempo de deslocamento (ns)

C=velocidade da luz (30 cm/ns)

L=comprimento da haste (cm)

O tempo de deslocamento refere-se ao período de propagação do pulso eletromagnético, o qual se desloca ao longo de um cabo coaxial até a haste de transmissão (sonda) cravada no solo. O pulso eletromagnético ao percorrer as hastes da sonda sofre o efeito da interação com as moléculas de água presentes no meio e retorna refletido ao cabo de TDR. Neste período o solo se comporta como um meio dielétrico (SOUZA et al., 2016b).

### 2.2.3. Modelos para a curva de calibração

Os primeiros trabalhos de pesquisa com TDR visando medir a umidade do solo foram desenvolvidos por Topp et al. (1980). Em sua pesquisa os autores propuseram um modelo de calibração denominado de “modelo universal”. O modelo de calibração proposto baseia-se na relação da constante dielétrica do solo ( $K_a$ ) com a umidade, segundo uma curva de calibração. A constante dielétrica do solo é extremamente sensível a mínimas variações de umidade. Desta forma, qualquer alteração na umidade do solo proporciona o aumento do tempo de deslocamento do pulso eletromagnético.

A equação universal de Topp et al. (1980) para conversão da constante dielétrica do solo ( $k_a$ ) em umidade volumétrica ( $\Theta$ ) é apresentada na equação 2:

$$\Theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} k_a - 5.5 \times 10^{-4} k_a^2 + 4.3 \times 10^{-4} k_a^3 \quad (2)$$

Importante destacar que este modelo proposto, em geral denominado modelo de Topp et al., (1980) em literatura, foi desenvolvido de forma a atingir o ponto referente à água pura, com  $K_a = 81$  para  $\Theta = 1$ , assumindo uma curva no formato “s” característico do modelo de terceiro grau, porém com o ponto de inflexão situado em uma região correspondente a  $\Theta > 0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o que se situa fora dos valores experimentais, para a maioria dos solos minerais. Assim, na faixa de valores usuais para umidade volumétrica, este modelo se apresenta coincidente com um modelo de segundo grau apenas.

Topp et al (1982a), ao conduzirem os primeiros trabalhos de pesquisa com a TDR, determinaram que as medidas de umidade apresentam erros relativamente insignificantes, sendo que os valores médios de umidade podem ser utilizados como referência para estimar a umidade no perfil do solo. A umidade desuniforme existente ao longo do comprimento da sonda não interfere nos valores mensurados ao longo do perfil, de forma que, estes valores medidos são semelhantes à média do perfil. Resultados similares foram encontrados por Pastuszka et al., (2014). Ao avaliarem solos saturados e solos secos, os autores verificaram que as medidas de umidade do solo representam a média aritmética da amostra, de maneira que os diferentes valores de umidade são decorrentes do potencial gravitacional e da evaporação da superfície do solo.

O modelo de calibração das sondas de TDR proposto inicialmente por Topp et al. (1980), sugere que uma única curva de calibração pode ser utilizada para todos os solos. De acordo com



este modelo, características como textura, salinidade e temperatura não apresentam qualquer influência sobre as curvas de calibração. Trabalhos posteriores realizados por Tomasselli; Bachi (2001); Coelho et al., (2006); Andrade et al., (2003); Elaiuy et al., (2009), Kaiser et al., (2010), propuseram uma abordagem diferenciada. Para estes autores, as curvas de calibração devem ser individuais e de acordo com cada solo.

A necessidade de um modelo isolado é decorrente da influência das propriedades físicas e químicas dos solos em relação ao modelo de calibração. Estes resultados não são integralmente confirmados por Manieri et al. (2007), uma vez que estes autores, ao trabalharem com calibração de sondas, verificaram que solos com textura semelhante podem ser representados por única curva de calibração. Serrarens et al., (2000), ao avaliarem os erros resultantes da calibração das sondas, observaram que as sondas calibradas individualmente apresentam erros de medição em torno de 0,005 e 0,015 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>. Ao serem comparados a sondas não calibradas isoladamente, os erros foram estimados na faixa de 0,025 a 0,03 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>.

A calibração das sondas de TDR pode ser afetada pela compactação, textura e contato da sonda com o solo. Trabalhos de pesquisa realizados com sondas artesanais indicaram que o contato incompleto das sondas com o solo proporciona erros de leitura dos valores de Ka do solo (SERRARENS et al., 2000; TRINTINALHA et al., 2001, NAKONIECZNA et al., 2015; COELHO et al., 2005).

As curvas de calibração construídas a partir dos valores de umidade do solo, devem relacionar os valores reais de umidade existentes no perfil do solo, com os correspondentes valores de Ka medidos com a TDR. Curvas de calibração alternativas, ou seja, aquelas que não são específicas para cada solo, devem ser evitadas, porque estas não são capazes de incorporar os efeitos das características físicas e químicas do solo em questão na relação local entre umidade do solo e correspondente constante dielétrica. (BITTELLI et al. 2008).

As propriedades físicas e químicas do solo proporcionam alterações nas leituras de Ka e, conseqüentemente, nos valores de umidade do solo. Quanto maiores os teores de argila e de óxido de Fe, maiores são os valores da constante dielétrica do solo. O diâmetro das partículas, teor de matéria orgânica e superfície específica são também responsáveis por variações de valores de Ka, (TOMMASELLI et al. 2001; KAISER et al., 2010; MANIERI et al. 2007, CRISTI et al. 2016).

De acordo com trabalho de Gubiani et al. (2015), a incorporação dos valores de Ka medidos em água eleva a precisão da curva de calibração, de modo que, a ausência de valores referentes a Ka em água ocasiona erros que variam na ordem de 0,1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

Cerny (2009) discute o fato de que a utilização de modelos empíricos para ajuste aos dados experimentais da curva de calibração, como por exemplo, os polinômios de segundo ou terceiro grau, é simples e fácil. Por esta razão, são largamente empregados. Desta forma, diversos trabalhos apresentam modelos com esta característica. Não obstante, este procedimento apresenta limitações. Uma delas é que não se pode extrapolar este modelo para umidades que não estejam na faixa monitorada pelos autores, durante o experimento, para aquele solo.

Outro fator, de grande importância, segundo Cerny (2009) é que estes modelos tendem, no sentido da secagem do solo, a convergirem para valores de  $\Theta$  menores que zero, quando  $K_a$  tende à unidade. Isto não tem sentido físico e requer cuidado. Por outro lado, também é possível que o modelo leve à condição limite de  $K_a$  ser igual a zero quando  $\Theta$  apresentar valor acima de zero. De um modo geral, os polinômios ajustados, se extrapolados, mostram uma destas condições. Segundo o autor, isto requer muito cuidado.

#### **2.2.4. Confeção de sondas: processos industriais e artesanal**

A utilização de sondas artesanais tem sido muito frequente para o monitoramento de água no solo. As principais razões para seu emprego são a precisão nas medidas de umidade do solo, o custo de fabricação relativamente inferior ao das sondas originais e a semelhança dos coeficientes das equações de calibração com as equações oriundas de sondas originais (MILANI et al., 2008; COELHO et al., 2016, SOUZA et al. 2006). De acordo com Souza et al. (2006a), as sondas artesanais, além de apresentarem um baixo custo de produção, podem ser fabricadas em grande quantidade, visto que, a confecção das mesmas é relativamente simples. Diversos resultados de pesquisa, ao comparar sondas originais e artesanais, indicaram que não existem diferenças significativa entre ambas (SONCELA et al. 2013; BATISTA et al., 2016, dentre outros).

Uma sonda de TDR é construída com duas ou mais hastes metálicas, espaçadas com uma determinada distância entre elas, da ordem de alguns centímetros. O comprimento destas hastes pode variar conforme a espessura da camada de solo que se deseja monitorar. A espessura de cada haste é da ordem de alguns milímetros, podendo variar conforme a aplicação desejada. Para garantir resistência física da sonda, as hastes são fixadas em uma base sólida, de material não metálico. Um cabo coaxial interliga o equipamento de TDR à sonda, devidamente instalada no solo, tornando possível levar até ela um pulso eletromagnético na frequência das micro-ondas. Este pulso percorre a sonda e o tempo necessário para que isto ocorra é medido pelo equipamento.

A velocidade de propagação deste pulso pode variar com a espessura da haste e com o espaçamento entre elas, embora esta influência não seja muito marcante, conforme alguns autores (SANT'ANA et al. 2012; ANAMI et al. 2006).

As sondas utilizadas para determinação da umidade apresentam diversas formas e modelos, mas podem ser classificadas em três grandes grupos. As sondas com duas hastes grossas (bi-hastes) permitem a instalação e remoção rápidas, permitindo fazer várias leituras em um determinado domínio. Sondas do tipo “buriable” ou enterráveis são fornecidas pelo fabricante com três hastes, usualmente, de comprimento especificado de acordo com os interesses do usuário e têm como propósito serem instaladas em uma posição para a realização de diversas leituras ali. Empregam hastes de menor diâmetro e podem também serem construídas com duas hastes apenas. Em relação às sondas coaxiais, estas apresentam uma haste segmentada, e são inseridas verticalmente no solo. A eficiência das sondas é verificada conforme as condições a que as mesmas são submetidas. Além disto, a inserção e a remoção no solo são responsáveis por promover erros nas medidas de Ka do solo (ANDRADE et al., 2003; JONES et al., 2003).

As sondas multi-segmentadas, diferente das demais sondas, permitem medidas de umidade do solo em diferentes profundidades, além de trechos com distintos valores de impedância. De acordo com os diâmetros das hastes e o número de segmentos, os trechos são interpretados por meio de um gráfico, que considera o coeficiente de reflexão e o tempo de deslocamento. Para o processo de confecção das sondas, utiliza-se aço inoxidável ou latão. Por apresentarem custo e mão-de obra relativamente menores, as sondas artesanais construídas a partir de latão têm substituído as sondas de aço inoxidável (SOUZA ; MATSURA, 2002; SOUZA et. al, 2006).

Manieri et al., (2007), em trabalhos de pesquisa com sondas espirais, verificaram que a eficiência destas sondas em determinar a umidade do solo é semelhante à de sondas com hastes contínuas, no entanto, para medidas ao longo do perfil do solo, as mesmas apresentam-se limitadas em decorrência da necessidade de uma elevada quantidade de sondas.

As sondas artesanais podem ser produzidas com diferentes comprimentos de hastes. No entanto, medidas de umidade do solo apresentam valores distintos ao relacionar o comprimento das hastes e a constante dielétrica do solo. Comprimento de haste abaixo de 0,15m é sinalizado no equipamento TRASE como sendo sujeito a imperfeições de medida. Valores entre este e 0,30m são considerados adequados. Para valores maiores que 0,30m, as dificuldades operacionais podem se tornar limitantes, sobretudo em termos de inserção da haste no solo. O comprimento das hastes deve ser considerado um item de fundamental importância para confecção das sondas, em decorrência da qualidade das medidas e facilidade na instalação. Geralmente tem sido empregados

diâmetros entre 2e10mm. Em relação ao espaçamento, os valores encontram-se entre os mais variados possíveis (COELHO et al. 2016; SANT'ANA, et al. 2012).

Topp et al., (1982b) ao avaliarem a eficiência da TDR verificaram a ocorrência de valores discrepantes de  $K_a$ , os quais foram associados, pelos autores, às lacunas preenchidas por ar que comprometem o contato entre solo e sonda. Por outro lado, Coelho et al., (2003) afirmaram que o espaçamento adotado entre hastes, bem como o número de hastes causam interferências, e refletem no aumento dos valores de impedância das sondas. O número de hastes e os valores de impedância estão diretamente relacionados, de forma que, quanto maior o número de hastes, menores são os valores de impedância. Para que as medidas de umidade do solo sejam precisas é necessário que o sinal eletromagnético seja interpretado de maneira correta (COELHO et al., 2003).

Segundo Coelho et al (2005), a utilização de resistores em série com  $15\Omega$  propicia aumento do coeficiente de reflexão, de maneira que a impedância do sinal de onda eletromagnética torna-se elevada. Em relação ao uso de capacitores, Coelho et al., (2001) e Coelho et al., (2003), ao avaliarem os efeitos do uso de capacitores em sondas originais e sondas artesanais, constataram que este não proporciona melhorias na qualidade da leitura. Desta forma, independente da origem das sondas, a instalação de capacitores não interfere na determinação da umidade do solo.

As sondas originais e artesanais, de acordo com trabalhos de Milani et al., (2008); Sant'ana et al. (2012), não apresentam diferenças em relação a precisão. Trabalhos comparando sondas originais e manufaturadas apresentaram resultados semelhantes e mostraram que, independente da origem, as sondas apresentam a mesma eficiência.

A construção artesanal das sondas deve ser seguida da identificação de um modelo de calibração para cada uma individualmente e, em seguida, deve-se avaliar a pertinência da utilização de um único modelo de calibração para todo o grupo de sondas construídas, a ser utilizado para o solo em questão. Para a utilização em outro solo, outro modelo deve ser obtido. Este procedimento de calibração deve ocorrer ao longo de um ciclo de secagem do solo, partindo-se de próximo da saturação até valores de umidade expressivamente abaixo do ponto de murcha permanente, assegurando-se a qualidade das estimativas a serem futuramente realizadas em campo.

### 2.2.5. Incorporação da densidade do solo no modelo de calibração

A densidade do solo ( $d_s$ ) é considerada uma variável imprescindível para compreender a qualidade física do solo. Processos como compactação, infiltração de água no solo e crescimento do sistema radicular estão diretamente relacionados com a densidade do solo. Os cálculos para a obtenção da  $d_s$  são realizados com base na massa de solo por unidade de volume. Alguns fatores interferem diretamente na densidade do solo. Entre os mais importantes destacam-se a porosidade total do solo, o tamanho e a distribuição das partículas, os quais são responsáveis por aumentar ou diminuir a  $d_s$  (REINERT et al. 2006).

A distribuição das partículas no solo está diretamente relacionada ao potencial matricial, de forma que, o aumento na proporção de poros menores favorece a retenção de água, tornando-a mais eficiente. Alterações na proporção de poros, impostas ao solo, afetam diretamente a  $d_s$  e a resistência do solo a penetração, bem como o intervalo hídrico e a redistribuição de água no perfil do solo (BLAINSKI et al., 2012).

Os valores de  $d_s$  permitem avaliar a condição estrutural do solo, o que pode contribuir para se identificar condição de compactação deste. A compactação do solo pode causar muitos danos a este, e este processo está relacionado com a utilização de implementos agrícolas, pisoteio de animais e exposição do solo a chuvas intensas (GUARIZ et al., 2009; ORTIGARA et al. 2014).

A densidade em solos com alta capacidade de infiltração torna-se reduzidas, e varia acordo com a porosidade. Nestas condições verifica-se um aumento da condutividade hidráulica. (HEATHMAN, et al., 2003; BITTELLI et al., 2008). A retenção de água no solo pode ser modificada com a distribuição e tamanho dos poros, bem como das partículas. Compreender a distribuição da água no perfil do solo auxilia no manejo eficiente da água, e possibilita atender a demanda hídrica das plantas (BLAINSKI, et al., 2009).

As curvas de calibração de acordo com Gonçalves et. al (2011) são altamente influenciadas pela densidade do solo. Para estes autores, caso os modelos de calibração não incorporem a variável  $d_s$ , podem produzir resultados discrepantes e imprecisos. Assim, estes autores ajustaram um modelo de calibração incorporando a  $d_s$ , conforme a equação 3.

$$\theta = [a_0 + a_1 D_s] + [b_0 + b_1 D_s] K_a + [c_0 + c_1 D_s] (K_a)^2 + [d_0 + d_1 D_s] (K_a)^3 \quad (3)$$

$$\theta = \text{umidade do solo com base em volume (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$$

$D_s$  = densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ )

$K_a$  = constante dielétrica

a,b,c,d = coeficientes numéricos do modelo.

### **2.2.6. Características físicas do solo e emprego da TDR**

As curvas de calibração para as sondas artesanais, assim como ocorre com as sondas originais, são afetadas por características específicas de cada solo. Batista et al. (2016) verificaram que, para solos de textura arenosa, a calibração apresenta erros menores. Por outro lado, TRINTINALHA et al. (2004) e PEREIRA et al. (2006) mostraram em seus trabalhos que, com o ajuste adequado de um modelo, solos argilosos também apresentam curvas de calibração precisas. A relação entre a constante dielétrica do solo e sua umidade é intimamente afetada pela granulometria do solo, de modo que os modelos de calibração, ao não considerarem a composição granulométrica, estão fortemente propensos a realizar medida de  $K_a$  imprecisas (SANTOS, 2013). Em síntese, pode-se dizer que estes trabalhos, assim como vários outros, demonstram que não se pode extrapolar uma curva de calibração obtida para solo de uma classe granulométrica para outro solo, com granulometria distinta. Os erros podem ser severos. TOMMASELLI e BACCHI (2001) obtiveram resultados que explicitam esta constatação.

A determinação da umidade do solo, empregando a técnica da TDR, pode ser realizada em amostras deformadas e amostras indeformadas. Estudos realizados por SANTOS et al. (2010) indicaram que a forma como as amostras são obtidas não apresentam influência sobre os valores de  $K_a$ . Resultados semelhantes foram apresentados por Medeiros et al. (2007). De acordo com estes autores, a utilização de amostras indeformadas minimiza a variabilidade espacial e pode promover uma melhor qualidade das medidas. Conforme Coelho et al. (2001) e Santos et al. (2010) pode-se realizar a calibração do equipamento TDR, tanto em amostras de solo deformadas, quanto não deformadas. Segundo os mesmos autores, o tipo da amostra de solo não interfere nos valores do conteúdo volumétrico de água no solo para um mesmo valor da constante dielétrica do solo.

A condição de uso do solo em uma determinada área pode impactar fortemente a sua condição física. Esta, por sua vez, ao estabelecer diferentes relações entre água e matriz do solo, para diferentes condições de uso do solo, pode influenciar nas relações entre o conteúdo de água do solo e a sua constante dielétrica. Isto tem um potencial para modificar a curva de calibração da

TDR para um mesmo solo, submetido a diferentes condições de uso, o que não pode ser negligenciado. Ao se modificar as condições do solo sob mata nativa, levando-o para a condição de um solo cultivado, é possível que alterações assim impostas modifiquem a interação água – solo e, conseqüentemente, a curva de calibração da TDR.

A infiltração de água no solo em áreas de vegetação nativa pode ser considerada mais eficiente ao ser comparada com a área cultivada. A estrutura física destes solos, bem como o sistema radicular das plantas, nestes ambientes contribui para promover a máxima infiltração de água no solo (BONO et al. 2012).

Solos de ambiente de mata, ao serem comparados com solos cultivados, em diferentes sistemas de manejo, apresentam elevada capacidade de armazenar água. Estas diferenças ocorrem principalmente devido à condição estrutural mais favorável e ao maior conteúdo de matéria orgânica.

As propriedades físicas e os atributos mineralógicos diferem de acordo com as classes de solo. No entanto, alterações decorrentes do manejo podem influenciar significativamente na composição dos solos. Áreas de mata apresentam macroporosidade elevada, menores densidades e maiores teores de matéria orgânica. Isto ocorre principalmente devido à ausência de práticas de manejo, às quais os solos são submetidos, em determinados sistemas de cultivo. A condutividade hidráulica nestes solos é considerada superior quando comparada a solos cultivados e estas diferenças são decorrentes principalmente da macroporosidade total e da drenagem da água no perfil do solo (LIMA et al., 2014, CUNHA et al., 2011; NUNES et al., 2010).

O sistema de cultivo adotado afeta diretamente as características relacionadas com a estrutura física do solo. Independente do sistema de cultivo agrícola empregado, as áreas destinadas à agricultura apresentam mudanças na estrutura do solo que afetam diretamente o crescimento das plantas (WENDLING, et al., 2012; BECKETT, et al., 2017, CARVALHO, et al 2014).

A capacidade de armazenar água no solo está relacionada a características do solo e ao sistema de cultivo. Solos cultivados apresentam valores de  $d_s$  relativamente superiores, em função de fatores relacionados principalmente ao manejo. Estudos que relacionaram o intervalo hídrico ótimo (IHO) e a  $d_s$ , mostraram a influência de ambos sobre o armazenamento de água no solo (MATIAS et al., 2009; GUIMARÃES et al. 2013; BLAINSKI et al., 2008).

Os solos ocupados por mata nativa caracterizam-se por apresentar umidade elevada, isto ocorre principalmente pela alta capacidade em armazenar água. O sistema de manejo por meio da cobertura vegetal favorece a manutenção da umidade e contribui para reduzir a evaporação de

água no solo (GOMES et al., 2015). Os solos de área de mata além de apresentarem maior macroporosidade, possuem densidade relativamente menor e, conseqüentemente, baixa resistência à penetração de raízes. Ao serem comparados a solos de áreas mecanizadas e de pastagem, os solos de mata apresentam elevada condutividade hidráulica e baixa densidade (ORTIGARA et al., 2014; OWUOR, et al., 2018).

Os solos submetidos a diferentes sistemas de cultivo apresentam porosidade reduzida, de modo que a capacidade de retenção de água torna-se um fator limitante ao crescimento do sistema radicular. A compactação do solo ocasionada pelo tráfego de máquinas resulta na redução da macroporosidade e da infiltração de água no solo, de modo que a resistência à penetração torna-se acentuada em função da configuração das partículas do solo nestas condições (TORMENA et al., 1998; GIRARDELLO, et al., 2017).

Portugal et al., (2010) e Luciano et al., (2010) ao avaliarem os atributos referentes aos solos de mata, verificaram a ocorrência de modificações advindas do uso e manejo do solo. Os teores de matéria orgânica e carbono nestes ambientes são relativamente maiores. A agregação do solo, influenciada pela atividade biológica, afeta diretamente o teor de matéria orgânica do solo. De fato, os solos de mata tendem a apresentar maiores teores de carbono orgânico. A umidade existente no solo afeta consideravelmente o seu teor de matéria orgânica, de forma que, solos com elevada biomassa e atividade biológica intensa são superiores em relação ao carbono orgânico (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2017).



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido na unidade de pesquisa em agricultura irrigada da Universidade Estadual de Maringá. Esta área experimental está localizada no município de Maringá, Estado do Paraná, com latitude de 23°25' sul e longitude de 51°57' a oeste de Greenwich. A altitude média é de 540 m e o clima predominante, segundo a classificação de Koeppen, é do tipo Cfa, mesotérmico úmido, com chuvas abundantes no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1500 mm. Nos meses de julho a agosto, concentram-se os menores índices de precipitação. A temperatura média anual é de 16,7°C, sendo que a média das mínimas alcança 10,3°C e a média das máximas atinge 33,6°C.

O solo da área é classificado como NITOSSOLO VERMELHO Distroférico (Embrapa, 1999), conforme Trintinalha et al. (2001), com A moderado. O relevo é suave ondulado, com declividade média de 8%. A composição granulométrica do solo da área experimental consiste em 75,7% de argila, 12% de silte e 12,3% de areia. Com base nos valores médios obtidos para a camada de 0 a 0,60 m de profundidade, pode-se caracterizar este solo como sendo de textura argilosa.

A curva de retenção de água no solo da área experimental foi obtida a partir de amostras não deformadas de solo, coletadas em anéis metálicos com volume em torno de 100 cm<sup>3</sup>, retiradas na profundidade de 0,30 m. Para os potenciais entre 0 e -6,0 kPa, foi adotada a metodologia que utiliza mesa de tensão. Para os demais potenciais, exceto para - 800 e -1500 kPa, as amostras foram submetidas às pressões correspondentes em câmara de Richards. Para os maiores módulos de potencial, foram usadas amostras deformadas de solo, também em câmara de Richards.

O modelo de estimativa de umidade volumétrica, em função do potencial matricial, proposto por Van Genuchten (1980), foi utilizado para fazer os ajustes da curva de retenção de água no solo. Esta curva foi usada para estabelecer os valores de umidade correspondentes à capacidade de campo (Cc) e o ponto de murcha (Pm). De acordo com Trintinalha et al. (2001), para o solo estudado, a umidade correspondente à capacidade de campo é da ordem de 0,44 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>. A umidade correspondente ao ponto de murcha, ou seja, em um potencial de -1500 kPa, é igual a 0,34 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>. Assim, a água disponível ou disponibilidade total de água (DTA) neste solo é da ordem de 0,10 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>, o que corresponde a 1,0 mm de água por centímetro de profundidade de solo (1,0 mm.cm<sup>-1</sup> = 0,1 m.m<sup>-1</sup>). É nesta faixa de valores de umidade que as medidas são de maior importância para os objetivos agronômicos.

### 3.1. Processo de construção das sondas artesanais

Um gabarito de madeira foi construído, com furos distanciados de 25 mm. Em cada posição foram colocadas duas hastes de aço inoxidável de 0,30 m de comprimento e de 3,3 mm de diâmetro. Em seguida um conector do tipo sindal (para cabos de 4 mm), foi fixado em uma das extremidades das hastes. As hastes foram presas a duas chapas metálicas de 22 mm de largura, por 50 mm de comprimento e 3 mm de espessura, com parafusos de fenda com cabeça cilíndrica de 4 mm/20 mm com porca e 2 arruelas. Em seguida tomou-se um cabo coaxial de 50 ohms, com 2 m de comprimento e, em uma das extremidades foi soldado um conector BNC de 50 ohms, que tem como função a conexão entre a sonda e o equipamento, conforme apresentado na Figura 1. Na outra extremidade foi separada a malha metálica externa do fio interno, onde foi soldado um capacitor de cerâmica de 5,4pF (pico Faraday). Estas extremidades foram fixadas nos conectores que estavam presos às hastes metálicas.

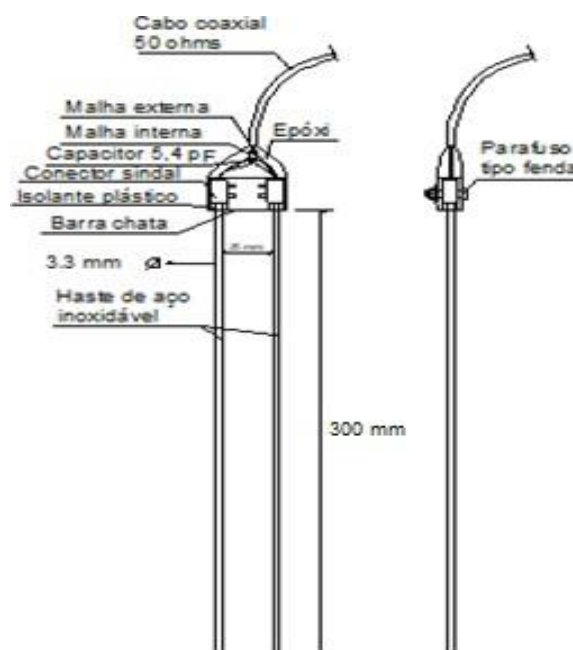


Figura 1 – Sonda para uso com o equipamento de TDR, construída artesanalmente, mostrando os componentes empregados.

As medidas de  $K_a$  foram realizadas empregando-se sondas artesanais e sondas originais, fornecidas pelo fabricante do equipamento de TDR modelo TRASE (Soil Moisture, Inc.), em

todas as condições avaliadas. Previamente a isto, todas as sondas artesanais tiveram seu desempenho avaliado em uma faixa de valores de umidade do solo entre a saturação e valores abaixo do equivalente ao ponto de murcha permanente.

### 3.2. Preparo dos microlisímetros e obtenção de amostras

Nesta etapa foram construídos microlisímetros com tubo de PVC de 100 mm de diâmetro por 25 cm de altura. Em seguida, 10 unidades foram inseridas em solo sob cultivo, como mostrado na Figura 2, na área experimental, enquanto outras 10 unidades foram inseridas no solo sob mata. Esta forma de preenchimento do microlisímetro consistiu em se cravar o tubo diretamente no solo, a partir da superfície, no ambiente de solo cultivado e também no solo sob mata.



Figura 2 – Obtenção de amostra indeformada de solo sob cultivo por meio da inserção com atuação hidráulica do microlisímetro, e posterior remoção do conjunto.

Introduziu-se o tubo no solo, lentamente, por meio de atuação hidráulica, até o seu total preenchimento. A retirada foi feita escavando-se o material em torno do tubo, de forma a assegurar que o solo no interior do recipiente não tivesse a sua estrutura deformada. Na Figura 3 é mostrada a inserção do tubo em área correspondente a solo sob mata. Pode-se observar a maior quantidade de raízes de plantas neste ambiente.



Figura 3 – Obtenção de amostra indeformada de solo sob mata por meio da inserção com atuação hidráulica do microlisímetro, e posterior remoção do conjunto.

Removidos do solo, os microlisímetros foram tratados de forma a remover o excedente de material em seu exterior. Em seguida, foram levados ao laboratório, onde se determinou a sua massa em condições de campo e, etapa seguinte, foram submetidos ao processo de saturação do solo no seu interior, por meio da imersão até, no máximo, dois terços da sua altura, em água acondicionada em um recipiente de dimensões suficientemente amplas.

Cada microlisímetro teve o material do seu interior saturado e, em seguida, as sondas foram instaladas, todas no mesmo momento, ou seja sob a condição de solo saturado e no sentido vertical, segundo as recomendações de Trintinalha (2000). O conjunto de microlisímetros com as sondas instaladas, assim como o equipamento de TDR empregado nas medidas, pode ser observado na Figura 4. Imediatamente após a instalação de cada sonda, foi realizada uma leitura do  $K_a$  com o propósito de verificar se existiria ou não interferência nas leituras, devido à proximidade das sondas. Como a precisão do equipamento é elevada, o que se traduz na habilidade deste de repetir a mesma leitura de  $K_a$  enquanto a umidade do meio permanece constante, qualquer interferência que viesse a ocorrer em função da proximidade das sondas poderia ser detectada, medindo-se  $K_a$  antes e após a instalação da sonda vizinha.

Em seguida ao processo de montagem e saturação, foram realizadas leituras regulares da constante dielétrica aparente do meio ( $K_a$ ), da umidade com base em massa ( $U$ ), obtida a partir da medida da massa do conjunto com uma balança de precisão. O valor da umidade base volume ( $\Theta$ ), foi obtido a partir da umidade base massa e da densidade do material acondicionado no

microlisímetro. A densidade do solo em cada um foi determinada ao final do processo de secagem, quando então levou-se o conjunto a uma estufa de secagem por 48 horas a 105 graus centígrados, obtendo-se a massa seca de solo em seu interior. A partir desta medida foi possível a determinação de  $d_s$ .



Figura 4 – Amostras indeformadas de solo sob cultivo e sob mata e sondas artesanais e originais instaladas no seu interior, para leitura de  $K_a$  com o TDR/TRASE.

A medida do valor de  $K_a$  ao longo do tempo foi feita diariamente, até que a umidade atingisse valores substancialmente abaixo do PMP (ponto de murcha permanente), para o solo em estudo que é de  $0.34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Valores de  $K_a$  inferiores a 10 unidades foram obtidos, de forma a assegurar, com ampla margem, esta condição de umidade.

### 3.3. Tratamento dos dados obtidos

Durante cerca de três meses, julho, agosto e setembro, medidas de  $K_a$  e de massa do conjunto, para obtenção da umidade base massa do solo no seu interior foram realizadas diariamente. A partir do valor da densidade do solo, obtida ao final, determinou-se a umidade base volume do solo, em cada microlisímetro. Estes valores, obtidos ao longo de um processo de

secagem do solo, foram analisados por meio de técnicas descritivas, para o conhecimento das características das suas distribuições de frequência.

### **3.4. Processo de secagem**

Durante o período em que os valores de  $K_a$  e correspondente umidade do solo foram medidos, pode-se observar que o processo de secagem era diferente para os dois sistemas analisados no presente trabalho. O solo sob mata, aparentemente, manteve-se mais úmido durante todo o processo. Assim, procurou-se avaliar o processo de secagem, comparativamente com outro, monitorado em TFSA, em condições de laboratório semelhantes às estabelecidas para o presente trabalho. Estes dados foram obtidos por Trintinalha (2000), com TFSA preenchendo microlisímetros iguais aos aqui utilizados. Os valores de densidade do solo para esta TFSA variaram entre 0,9 e 1,28  $Mgm^{-3}$ , sendo, em geral, inferiores aos valores obtidos para o solo nas condições de campo avaliadas. Não obstante, estes valores foram obtidos promovendo-se diferentes níveis de compactação do solo dentro dos microlisímetros.

Em função das diferenças entre valores de  $d_s$  nos dados obtidos para solo em condições de campo e para TFSA, optou-se por comparar os processos de decréscimo de valores da umidade com base em massa ( $U$ ) obtidos nos três conjuntos de dados.

### **3.5. Ajuste de modelos de regressão linear**

Em seguida, foram ajustados modelos polinomiais pelo método dos mínimos quadrados, aos pares de valores de  $K_a$  e de  $\Theta$ , de forma a se estabelecer um modelo de calibração para a TDR. Os dados foram agrupados em diferentes conjuntos. Inicialmente, tomou-se todos os 3439 pares de valores obtidos e ajustou-se um modelo quadrático a eles. Em seguida, foi feito o ajuste de um modelo quadrático para os dados obtidos com sondas originais e outro para os dados obtidos para sondas artesanais. Após, buscou-se o ajuste para cada conjunto de dados referentes aos dois tipos de sondas, nos dois ambientes estudados, solo sob mata e solo sob cultivo.

Para fins de comparação entre os modelos ajustados para as condições de solo no campo com modelo ajustado para TFSA, foram empregados dados obtidos em laboratório e apresentados

por Gonçalves et al. (2011). Foram selecionados apenas os valores obtidos em microlisímetros que tiveram preenchimento com TFSA com  $d_s$  superior a  $1,27\text{Mgm}^{-3}$  e tendo com limite superior  $1,38\text{Mgm}^{-3}$ . A partir destes dados, em conjunto com outros obtidos para TFSA com densidades menores, Gonçalves et al. (2011) estabeleceram um modelo de regressão linear múltipla incorporando o valor da densidade do solo na curva de calibração. Este modelo foi descrito de acordo com a equação 4.

$$\theta = [a_0 + a_1D_s] + [b_0 + b_1D_s] K_a + [c_0 + c_1D_s](K_a)^2 + [d_0 + d_1D_s](K_a)^3 \quad (4)$$

Os coeficientes empíricos do modelo foram obtidos utilizando o programa SAS (SAS Institute, 1999) e estão apresentados na Tabela 1. O teste t foi utilizado para avaliar a significância estatística dos coeficientes estimados conforme Netter et al. (1989). Os autores identificaram que o termo de terceiro grau obteve coeficientes numéricos não significativos, razão pela qual o modelo final de calibração apresentado foi o quadrático, com coeficientes cujos valores são:

Tabela 1 - Coeficientes do modelo de Gonçalves et al. (2011) entre umidade com base em volume ( $\theta$ ) e constante dielétrica aparente ( $K_a$ ) e densidade do solo ( $D_s$ ):

Coeficiente	Valor
$a_0$	0,842538
$a_1$	- 0,725175
$b_0$	- 0,049601
$b_1$	0,060353
$c_0$	0,001044
$c_1$	- 0,001061

Este modelo foi avaliado no presente trabalho para descrever a curva de calibração da TDR para os dados obtidos em amostras indeformadas, nas condições de campo estudadas. Para isto, no entanto, não se empregou os coeficientes ajustados pelos autores citados. Optou-se por ajustar um modelo com a mesma forma, porém obtendo-se os coeficientes numéricos por meio de regressão linear múltipla realizada com o conjunto de dados atuais. Esta opção foi feita porque os autores trabalharam com TFSA, enquanto nas condições do presente trabalho, as amostras foram coletadas em campo, para serem indeformadas.



Para estas amostras indeformadas, nas condições estudadas, inicialmente ajustou-se um modelo quadrático completo, com termo independente, a cada conjunto de dados estabelecido. Verificou-se que todos convergiam para valores de intercepto muito próximos de zero, porém um pouco acima dele. Como não há sentido físico nisto, ou seja, valores de umidade volumétrica acima de zero, para  $K_a$  igual a zero, conforme Cerny (2009), optou-se por ajustar todos os modelos novamente, fixando a origem dos eixos como sendo um ponto comum para todos. Este procedimento permitiu comparar os coeficientes numéricos dos termos de primeiro e de segundo grau, nas diferentes combinações de dados. Todos os coeficientes obtidos foram avaliados pelo teste “t” e mostraram-se altamente significativos ( $p < 0,0001$ ). Os termos de terceiro grau não foram significativos nas condições estudadas, razão pela qual não se trabalhou com este termo nos modelos ajustados.

Para o conjunto de dados referentes à TFSA selecionados, ajustou-se um modelo quadrático, porém preservando o termo independente, uma vez que este mostrou-se fisicamente consistente e permitiu a comparação com os modelos ajustados aos dados obtidos para as amostras indeformadas, nas duas condições de campo. Isto foi feito tanto para umidade com base em volume como para umidade com base em massa, para os dados obtidos nos dois ambientes de campo e com os dois padrões de sonda empregados.

### **3.6. Comparação com modelo de Topp e ajuste de modelo de terceiro grau completo.**

A aplicação da TDR difundiu-se mundialmente a partir dos anos 80 com a divulgação por Topp et al. (1980) de um modelo de terceiro grau entre  $K_a$  e umidade volumétrica do solo, com coeficientes preconizados como universais pelos autores. Este modelo pode ser descrito como:  $\theta = a + bK_a + c(K_a)^2 + d(K_a)^3$  e os autores apresentaram os seguintes valores para os coeficientes numéricos:  $a = -5,30 \times 10^{-2}$ ;  $b = 2,92 \times 10^{-2}$ ;  $c = -5,50 \times 10^{-4}$  e  $d = 4,30 \times 10^{-6}$ . Este modelo descreve uma curva de terceiro grau característica, para valores de  $K_a$  entre 3, correspondente a solo seco e 81, correspondente à constante dielétrica da água pura, o que seria equivalente a uma umidade volumétrica igual a 100% ou seja,  $1 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ .

Esta característica do modelo de Topp tem levado autores a ajustar modelos de terceiro grau aos dados experimentais, para descrever a curva de calibração da TDR. Em alguns casos, procura-se adicionar o ponto referente ao par de valores correspondente à água pura ( $K_a = 81$ ;  $\Theta$



= 1) para, supostamente, incrementar a qualidade de ajuste do modelo. No presente trabalho, modelos com estas características foram ajustados aos valores experimentais e avaliou-se o incremento de qualidade da estimativa da umidade do solo que este procedimento pode proporcionar.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise descritiva dos dados

Na Tabela 2 é apresentada a estatística descritiva para os valores das quatro variáveis analisadas no presente trabalho, ou seja, a constante dielétrica ( $K_a$ ), a umidade com base em volume correspondente ( $\Theta$ ), a umidade com base em massa ( $u$ ) e a densidade do solo ( $d_s$ ), com todos os dados agrupados, para os dois ambientes avaliados (Solo M e Solo C). Foram obtidos 3439 valores de umidade e correspondente  $K_a$ , nos vinte frascos (microlisímetros) com diferentes valores de densidade do solo, variando entre 1,27 e 1,46  $Mg\ m^{-3}$ . Verifica-se na Tabela 2 que o valor de  $K_a$  no presente trabalho variou entre 35, o que correspondeu a solo com cerca de 0,60  $m^3\ m^{-3}$  de umidade volumétrica, ou seja, em condições próximas à saturação, até o valor de 3, que corresponde, teoricamente, a solo seco. Destaca-se, no entanto, que não se trabalhou com solo seco em estufa e que, em termos práticos, valores de  $K_a$  entre 3 e 6 foram obtidos em condições de solo seco ao ar, em condições naturais, com umidade gravimétrica da ordem de 0,12  $Mg\ Mg^{-1}$ . Foi possível constatar que, para valores de  $K_a$  abaixo de 10, os pontos experimentais mostram considerável aumento de dispersão em torno de um modelo de calibração, evidenciando o aumento da incerteza associada às medidas. Não obstante, isto não se caracteriza como um problema, uma vez que o interesse agrônômico por medidas nesta faixa de umidade do solo é praticamente irrelevante.

Verifica-se na Tabela 2 que os valores de média e mediana, para as variáveis em questão, são semelhantes entre si, o que sugere simetria das distribuições dos dados. Alguns poucos valores de umidades, obtidos abaixo do limite inferior (LI) para “outliers”, revelam um nível de assimetria negativa destas distribuições, o que decorre do fenômeno descrito anteriormente, da perda de qualidade de medidas em solo muito seco. MOUAZEN, et al. (2018) ao utilizarem o TDR em solos secos, constaram que a inserção das sondas é dificultada devido à baixa umidade do solo, isto ocasiona a formação de lacunas de ar e conseqüentemente erros nos valores de  $K_a$  medidos. Em função da opção por se trabalhar em faixa de valores de umidade a mais ampla possível, verifica-se que os coeficientes de variação de valores de umidades situaram-se na ordem de 21 a 22%. Para  $K_a$ , esta variação é mais ampla, da ordem de 31%, compatível com a descrição teórica da relação entre estas variáveis. Não foram verificados valores superiores discrepantes, uma vez

que os valores máximos obtidos estão menores que o limite superior para caracterização de “outliers”, para as variáveis analisadas.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos valores das variáveis medidas, para todo o conjunto de dados obtidos com solo de mata e solo cultivado: constante dielétrica ( $K_a$  – adimensional), umidade base volume ( $\Theta$  –  $m^3m^{-3}$ ). Umidade com base em massa ( $u$  –  $MgMg^{-1}$ ) e densidade do solo ( $ds$  –  $Mgm^{-3}$ ).

Estatística	Variáveis avaliadas			
	$K_a$	$\Theta$	$u$	$ds$
Número	3439	3439	3439	20
Mínimo	3,0	0,160	0,116	1,272
Máximo	34,8	0,602	0,444	1,459
Média	20,2	0,418	0,305	1,374
Mediana	20,0	0,426	0,311	1,357
$dp$	6,2	0,0879	0,0674	0,0579
Variância	38,3	0,008	0,005	0,003
QI	15,8	0,369	0,266	1,332
QS	25,2	0,485	0,351	1,445
AI	9,4	0,116	0,085	0,11
CV	30,7	21,0	22,1	4,2
LI	1,7	0,195	0,138	1,164
LS	39,3	0,659	0,479	1,613
Amplitude	31,8	0,442	0,328	0,187

Observa-se que os valores de densidade do solo abrangeram a faixa que usualmente se verifica para o solo em questão, em condições de campo (Blainski et al., 2009). De acordo com estes autores, os maiores valores encontrados em campo situaram-se próximos ao valor identificado como a densidade crítica, correspondente ao valor nulo de intervalo hídrico ótimo (IHO). O coeficiente de variação de apenas 4,2% mostra que a faixa de valores de  $ds$  encontrada no campo e na mata é estreita, não diferindo substancialmente um ambiente do outro, embora tenha sido observado que os valores na área cultivada tenderam a ser mais elevados. Nesta faixa de valores de densidade, Gonçalves et al. (2011) mostraram que os modelos ajustados à curva de calibração para a TDR, em condições de laboratório, trabalhando com TFSA oriunda deste solo, são polinomiais de segundo grau.

## 4.2. Processo de secagem

Exclusivamente para fins de avaliação do processo de secagem, um conjunto de dados obtidos em laboratório, sem controle artificial de temperatura, conforme descrito em Trintinalha (2000), também foi utilizado. Este conjunto de dados, obtidos a partir de TFSA, apresentou densidade do solo média de  $1,06 \text{ Mgm}^{-3}$ . A umidade gravimétrica deste material foi monitorada entre os valores de 0,49 e  $0,10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , correspondendo a valores de constante dielétrica, medida com a TDR, entre 34,6 e 6,0, respectivamente. Estes valores podem ser verificados na Figura 5, na qual o processo de secagem, para as três condições descritas, é apresentado. Destaca-se a opção de utilização da umidade gravimétrica, pois esta foi a variável avaliada diretamente no trabalho, além de que a diferença entre os valores de densidade do solo de TFSA e os referentes às amostras indeformadas é elevada ( $1,06$  e  $1,37 \text{ Mgm}^{-3}$ , em média), influenciando substancialmente os valores das umidades volumétricas nos conjuntos avaliados.

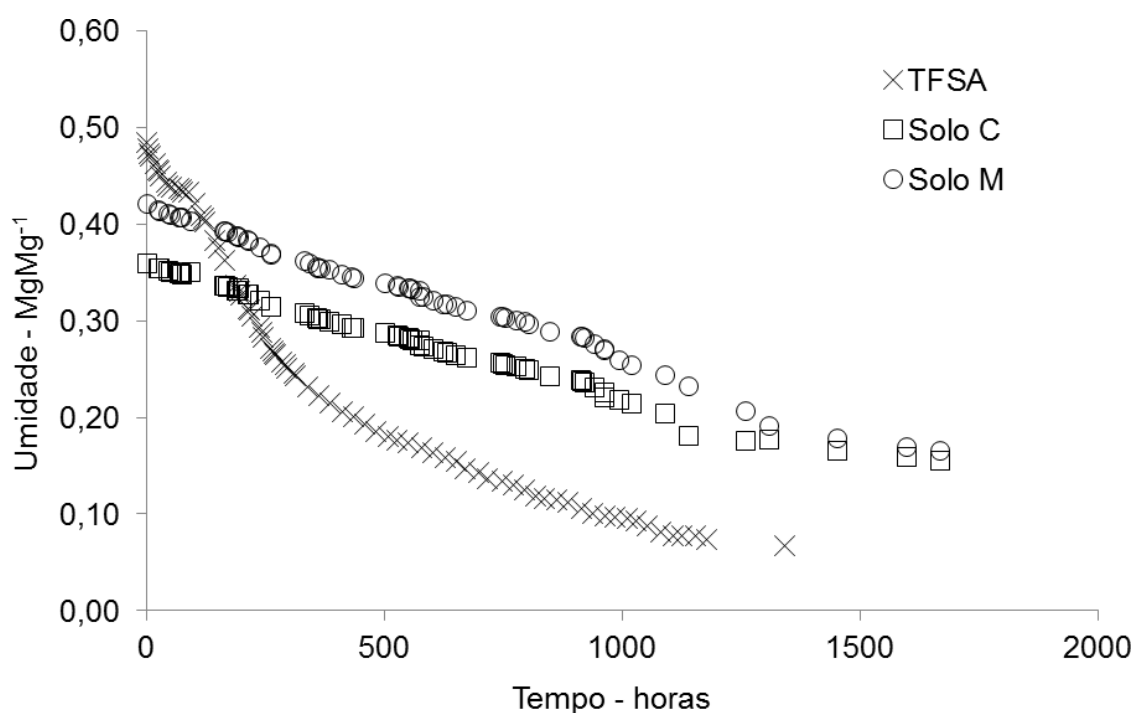


Figura 5 –Valores de umidade gravimétrica do solo nos três conjuntos avaliados: material deformado, em Laboratório (TFSA), amostras não deformadas de Solo Cultivado (Solo C) e de Solo sob Mata (Solo M), ao longo do tempo, segundo o processo de secagem.

Pode-se verificar que o valor de umidade inicial para a TFSA é superior aos identificados para as amostras não deformadas. Isto decorre do fato de que ao se desestruturar o solo e peneirar cria-se um volume de macroporos, entre os agregados de diâmetro igual ou inferior a 2 mm, os quais possibilitam a retenção de água em grande proporção, na faixa de potenciais entre zero (saturação) e capacidade de campo. Não obstante, esta água é fracamente retida junto à matriz do solo, o que faz com que o processo de secagem deste material seja muito mais rápido do que para as amostras indeformadas. De acordo com Blainski (2009) e Tormena et al., (2002) a desestruturação do solo promove o aumento da macroporosidade, sendo que este efeito é decorrente da mobilização do solo e resulta na alteração da estrutura do mesmo. Na Figura 5 pode-se observar que em um tempo da ordem de 250 horas a umidade deste material torna-se inferior à dos outros dois.

Observa-se na Figura 5 que o processo de secagem das amostras, em condições naturais, é lento, principalmente para as amostras não deformadas, obtidas em campo. Dentre estas, destaca-se o fato de que, em média, o solo sob mata permaneceu sempre com umidade superior à verificada para o solo sob cultivo (GOMES et al. 2015; LIMA et al., 2014;). Provavelmente isto está associado a um maior conteúdo de carbono orgânico na área sob mata, além de uma distribuição de tamanho de poros mais favorável à retenção de água neste sistema. Segundo PORTUGAL (2010) solos com altos teores de matéria orgânica apresentam armazenamento de água relativamente superior. O efeito visual deste processo foi marcante, durante o processo de secagem, permitindo observação visual deste fato. Para ambos, após cerca de 800 horas do processo de secagem, observa-se uma ligeira alteração da inclinação da curva, o que pode estar associado à elevação da temperatura ambiente.

Para ambos os solos, a secagem das amostras indeformadas assume uma tendência linear, sobretudo nas primeiras mil horas do processo. Após isto, há uma leve tendência de se acentuar a declividade da reta que descreve o processo, provavelmente em resposta a uma elevação de temperatura ambiente, decorrente da evolução da temperatura média diária ao longo do ano. O trabalho foi conduzido nos meses de junho a setembro, com expressiva elevação de temperatura ambiente. Destaca-se que o solo cultivado, em função da redução da macroporosidade, decorrente, sobretudo, das ações antrópicas, apresentou valores de umidade sempre inferiores àqueles obtidos para o solo da mata. Resultados similares foram verificados por Girardello, et al., (2017). Estes autores, ao avaliarem as causas da compactação em solos cultivados, verificaram que a mesma afeta diretamente a macroporosidade do solo e que, nestas condições o armazenamento de água torna-se limitado. No solo sob mata, um provável conteúdo de matéria orgânica, mais elevado,

associado aos processos de estruturação do solo, decorrentes de ações biológicas, promovem uma presença de poros de maior diâmetro, bem como uma melhor distribuição de tamanho de poros. Estas ações incluem a influência dos diferentes sistemas radiculares das plantas ali presentes, bem como da atividade da microfauna, tornando possível a retenção de um maior conteúdo de água em uma ampla faixa de valores de potencial de água no solo.

Somente após cerca de 1250 horas do início do processo é que os valores de umidade do solo sob mata e do solo cultivado se igualam, em termos médios. Isto evidencia a forte capacidade que o solo da mata tem de preservar água junto à sua matriz por mais tempo, o que decorre dos efeitos descritos. Destaca-se que, neste momento, a umidade média obtida para TFSA é aproximadamente igual à metade dos valores obtidos para as amostras não deformadas, tendendo a se estabilizar em um valor um pouco abaixo de 10%.

Desta forma, verifica-se que a perda de água ocorre de forma distinta para os ambientes estudados, notadamente entre as condições de material alterado e solo indeformado. Não obstante, talvez seja possível se ter uma única curva de calibração para expressar a relação entre a constante dielétrica e o conteúdo de água destes materiais. Por outro lado, estas diferentes relações entre água e matriz sólida podem impactar a curva de calibração, ocasionando diferenças. Assim, as curvas foram analisadas em cada um dos ambientes e comparadas entre si.

### **4.3. Modelos de calibração para dados em conjunto**

Os dados referentes à umidade volumétrica do solo e respectiva constante dielétrica, obtidos para Solo C e para Solo M foram agrupados em um único conjunto, independente das sondas serem originais ou artesanais. Ajustou-se um modelo quadrático de calibração, com o intercepto fixado no zero, para fins de comparação entre estes e os dois subgrupos constituído para os dados referentes às sondas originais e sondas artesanais. Os valores para este conjunto completo de dados estão apresentados na Figura 6, na qual se tem também o modelo ajustado.

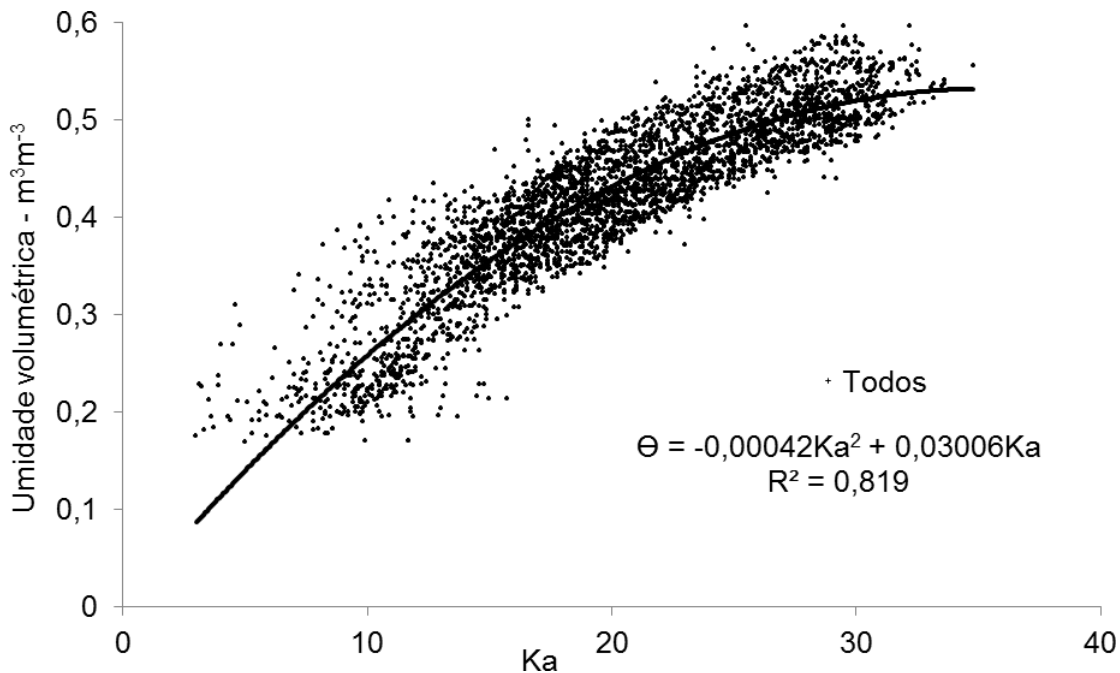


Figura 6 – Valores de umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica do material para todo o conjunto de dados, incluindo sondas originais e artesanais.

Verifica-se na Figura 6 que o modelo quadrático mostrou-se o melhor para a descrição do processo em análise, com coeficientes significativos pelo teste “t” para ambos os termos e com um coeficiente de determinação da ordem de 82%. Como se trata de um conjunto amplo de dados, envolvendo as duas situações distintas, abordadas no trabalho, bem como por reunir os conjuntos de dados referentes às sondas originais e artesanais, pode-se destacar que este valor é relativamente elevado, sugerindo que um modelo único de calibração poderia ser, em princípio, empregado. Destaca-se nesta Figura 6 o fato de que a dispersão dos pontos é elevada para valores de  $K_a$  abaixo de 15, conforme discutido anteriormente, revelando a fragilidade da técnica de TDR para avaliações nestas circunstâncias.

Na Figura 7 são apresentados os valores obtidos com o emprego das sondas originais. Observa-se que a dispersão para valores de  $K_a$  abaixo de 15 foi menor, evidenciando que, nesta faixa de valores, as sondas originais mostram-se melhores que as artesanais. Pode-se observar na Figura 8, construída com os dados das sondas artesanais, que estas apresentam maior dispersão dos valores nesta faixa. Não obstante, isto não é um fator de grande relevância para atestar melhor qualidade das sondas originais, uma vez que esta faixa de valores de umidade do solo tem pouco

interesse prático, do ponto de vista agrônomo. Por estar consideravelmente abaixo do ponto de murcha permanente, leituras nesta faixa de umidade são pouco relevantes em termos operacionais em sistemas de produção agrícola. Destaca-se que, para este solo, Blainski et al. (2009), assim como Trintinalha et al. (2001), identificaram o valor de  $0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  como sendo correspondente ao ponto de murcha permanente para este solo. Em termos médios, pode-se verificar na Figura 6 que este valor de umidade corresponde a valores de  $K_a$  um pouco acima de 15.

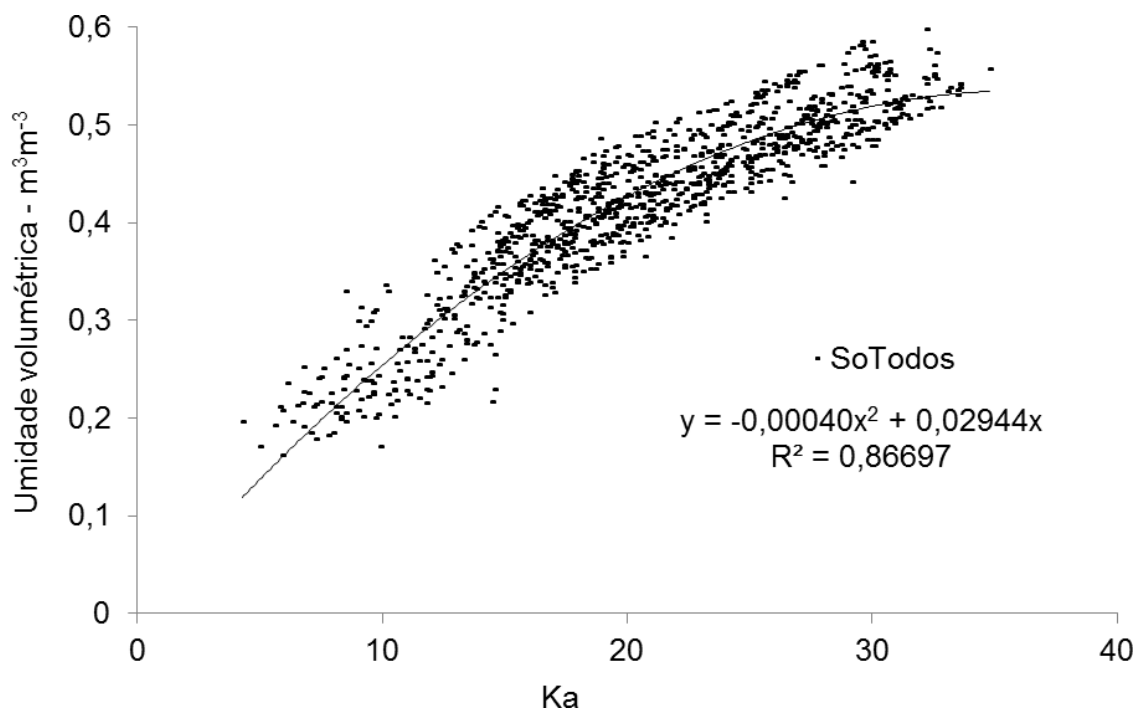


Figura 7 - Valores de umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica do material para o conjunto de dados referentes às sondas originais.

Observa-se que o coeficiente de determinação para as sondas originais atingiu 87%, sendo melhor em função, sobretudo, da maior dispersão verificada na baixa umidade, verificada para as sondas artesanais.

Na Figura 8 pode-se verificar que o coeficiente de determinação do modelo para as sondas artesanais atingiu o valor de 80%, sendo inferior ao obtido para as sondas originais. Pode-se observar, no entanto, comparando-se as Figuras 7 e 8, que a dispersão dos pontos experimentais em torno do modelo, para valores de  $K_a$  acima de 15, é muito semelhante.



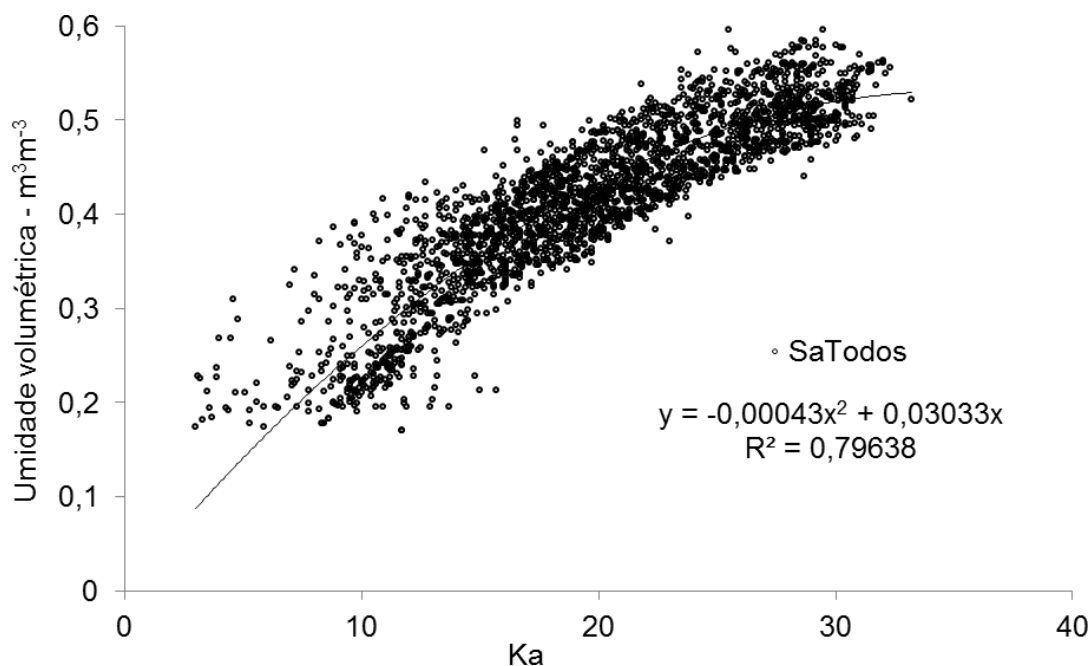


Figura 8 - Valores de umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica do material para o conjunto de dados referentes às sondas artesanais.

Pode-se observar, também, que a variação entre os valores do coeficiente do termo de segundo grau é da ordem de  $3 \times 10^{-5}$ , ou seja, 7% do valor médio, entre sondas artesanais e originais. Para o coeficiente do termo de primeiro grau, é da ordem de  $8,9 \times 10^{-3}$ , ou seja, 3% do valor médio, o que revela a semelhança entre os modelos e sugere a adoção de um modelo único, conforme apresentado na Figura 6, cujos coeficientes assumem valores intermediários, porém com estas pequenas amplitudes. Isto atesta, de forma consistente, a qualidade das sondas produzidas artesanalmente, sobretudo na faixa de valores de umidade do solo de maior interesse agrônomo, ou seja, entre a capacidade de campo ( $0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ) e ponto de murcha permanente ( $0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ), para este solo. Estes valores correspondem a valores de  $K_a$  na ordem de 15 a 25, intervalo de valores no qual a dispersão dos dados é menor, conforme pode ser visto na Figura 6. Os resultados verificados no presente estudo concordam com Sant'ana et al. (2012) e Trintinalha et al., (2000). Conforme verificado pelos autores, as sondas construídas artesanalmente apresentam precisão semelhante a sondas originais e podem ser utilizadas para medidas de umidade do solo.

#### 4.4. Modelos individualizados

Com o propósito de avaliar melhor o ajuste de um modelo para a curva de calibração da TDR, bem como para avaliar comparativamente entre as condições estudadas, procedeu-se ao ajuste de um modelo para cada condição, referente às combinações entre sondas originais (So) e sondas artesanais (Sa) e as duas condições de campo, referente à cobertura vegetal mata (Solo M) e campo cultivado (Solo C). Também foram empregados dados obtidos por Gonçalves et al. (2011), para TFSA, com densidades (ds) variando entre 1,27 e 1,38Mgm<sup>-3</sup>. Estes foram escolhidos por apresentarem uma faixa de densidade imposta à TFSA semelhante ao obtido para a condição de campo, para ambas as coberturas. Com estes valores de ds, o modelo que melhor se ajusta é o modelo quadrático, de forma semelhante ao verificado para o conjunto de dados obtidos para as amostras indeformadas.

Na Tabela 3 é mostrada a estatística descritiva para os valores das quatro variáveis analisadas no presente trabalho, ou seja, a constante dielétrica (Ka), a umidade com base em volume correspondente ( $\Theta$ ), a umidade com base em massa (u) e a densidade do solo (ds), para o conjunto de dados obtidos por Gonçalves et al. (2011), para TFSA. As medidas das variáveis foram efetuadas em 102 pontos experimentais. Pode-se verificar que a faixa de valores de densidade do solo é semelhante àquela apresentada para os dados referentes às amostras obtidas no campo, apresentada na Tabela 2, destacando-se que alguns valores no campo foram superiores ao obtido para TFSA. Em termos de valores de média e mediana, os valores obtidos em campo (Tabela 2) são superiores aos apresentados na Tabela 3. Não obstante, a comparação entre os modelos obtidos para as duas condições foi feita, presumindo-se semelhança de valores de ds. Os valores dos coeficientes de variação expressam dispersão semelhante para os conjuntos de dados, sendo um pouco mais elevados para TFSA embora a amplitude total dos dados seja menor para esta condição.

Não se verifica a presença de dados discrepantes inferiores, o que decorre da opção de não se amostrar para valores de Ka inferiores a 10, neste experimento. No outro extremo, apenas para Ka se verifica algum valor ligeiramente acima do LS considerado para dados discrepantes, mas isto não ocorre para os valores de umidade. Assim, todos os valores resumidos na Tabela foram utilizados nas análises que se seguiram.

Tabela 3 – Estatística descritiva dos valores das variáveis medidas, para todo o conjunto de dados obtidos com TFSA: constante dielétrica (Ka – adimensional), umidade base volume ( $\Theta$  –  $m^3m^{-3}$ ). Umidade base massa (u –  $MgMg^{-1}$ ) e densidade do solo (ds –  $Mgm^{-3}$ ), Gonçalves et al. (2011).

Estatística	Variáveis avaliadas			
	Ka	$\Theta$	u	ds
Número	102	102	102	3
Mínimo	10,5	0,148	0,107	1,270
Máximo	33,8	0,474	0,358	1,380
Média	17,9	0,288	0,214	1,346
Mediana	16,2	0,280	0,209	1,380
dp	6,0	0,0805	0,0614	0,0448
Variância	35,6	0,006	0,004	0,002
QI	13,4	0,222	0,166	1,330
QS	20,3	0,346	0,257	1,380
AI	6,9	0,125	0,092	0,05
CV	33,3	28,0	28,6	3,3
LI	3,0	0,035	0,028	1,255
LS	30,7	0,533	0,395	1,455
Amplitude	23,3	0,326	0,251	0,110

Na Figura 9 são apresentados os valores de umidade e Ka obtidos com as sondas construídas artesanalmente para o solo da mata e para o solo cultivado, bem como para os dados obtidos a partir da TFSA.

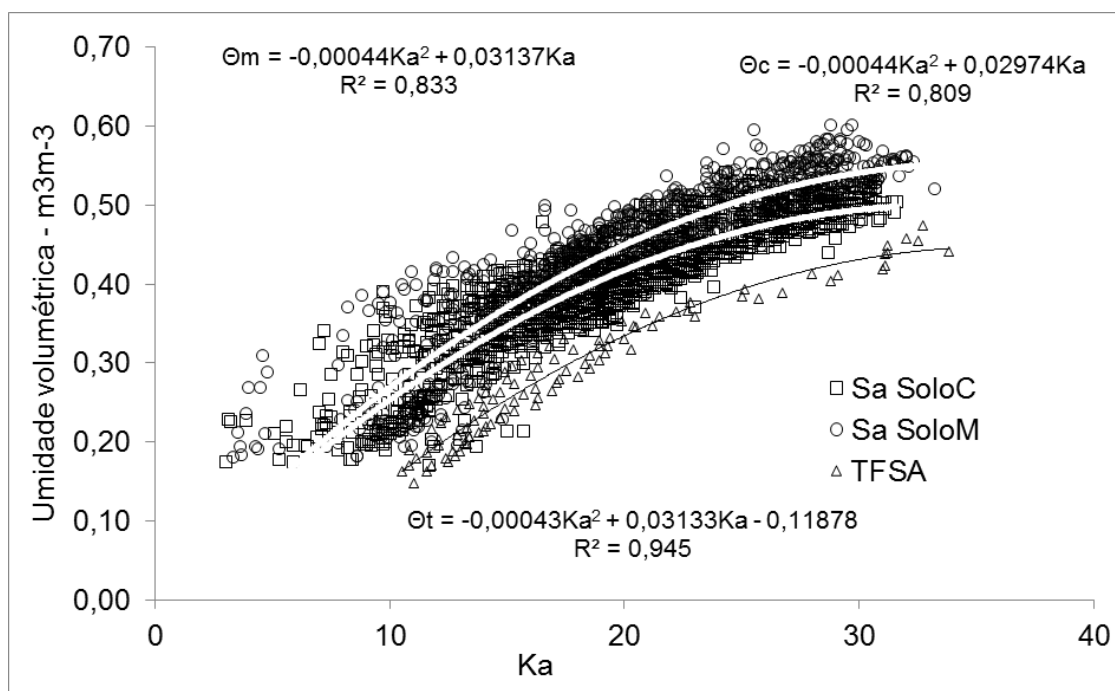


Figura 9 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração.

As linhas em branco referem-se aos modelos ajustados para o solo sob mata (superior) e para o solo cultivado (inferior). As equações de segundo grau correspondentes, sem termo independente, são apresentadas na parte superior do gráfico. Observa-se na Figura 9 que os valores obtidos para o solo sob mata apresentam-se ligeiramente acima dos valores obtidos para o solo cultivado e que estes se situam acima dos dados obtidos para a TFSA. A diferença entre os dois ambientes com amostras indeformadas manifesta-se principalmente na condição de maior umidade do solo. Pode-se verificar que as curvas que descrevem os modelos de calibração ajustados estão muito próximos para valores de  $K_a$  em torno de 10 e diferem mais para valores de  $K_a$  próximos a 30. Isto está expresso pelos valores dos coeficientes dos modelos ajustados, os quais são iguais para o termo de segundo grau (-0,00044) e diferem ligeiramente no termo de primeiro grau (0,00163 de diferença, o que corresponde a 5% do valor médio). Em termos médios, pode-se afirmar que os modelos são diferentes para os dois ambientes, mas que esta diferença é pouco significativa. A qualidade do ajuste, em ambos os casos, é semelhante, expressa por coeficientes de determinação da ordem de 83 e 81%.

Para a TFSA, na faixa de valores de densidade empregada, ou seja, entre 1,27 e 1,38Mgm<sup>3</sup>, pode-se verificar que o modelo quadrático completo ajustado apresentou, praticamente, os mesmos coeficientes dos modelos anteriores, tanto para o termo de segundo grau quanto para o de primeiro. No entanto, este modelo apresenta um termo independente cujo valor é da ordem de 0,119. Ou seja, a calibração feita nestas amostras de TFSA levou a um modelo de calibração que subestima o valor da umidade gravimétrica em cerca de 0,119 m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>, ou seja, em 1,19mm de lâmina de água por centímetro de profundidade de solo. Esta diferença é relevante para os cálculos de lâmina de água disponível no solo para as culturas, correspondendo a quase 120% da faixa de água disponível para este solo, que é da ordem de 1,0mmcm<sup>-1</sup>. Para o mesmo valor de Ka, o valor da umidade no solo em condições naturais ou de cultivo é maior que para a TFSA.

Na Figura 10 são apresentados os valores de umidade e Ka obtidos com as sondas originais para o solo da mata e para o solo cultivado, bem como para os dados obtidos a partir da TFSA. As linhas em branco referem-se aos modelos ajustados para o solo sob mata (superior) e para o solo cultivado (inferior). As equações de segundo grau sem termo independente, referentes a estes modelos, assim como na Figura 9, são apresentadas na parte superior do gráfico.

É grande a semelhança entre os modelos apresentados nas Figuras 9 e 10, para o solo sob mata, com os dois tipos de sondas. A variação do coeficiente do termo de segundo grau é de apenas  $2 \times 10^{-5}$ , enquanto a variação no termo de primeiro grau é da ordem de  $1 \times 10^{-3}$ . Em termos operacionais, podem ser considerados dois modelos iguais. Para as sondas artesanais o R<sup>2</sup> foi de 83% e para as sondas originais, de 87%. Isto revela uma dispersão ligeiramente inferior para as sondas originais, o que se verifica, sobretudo, para valores de Ka abaixo de 10. Na faixa de Ka entre 15 e 30 as dispersões são muito semelhantes. Situação semelhante pode ser descrita para os modelos obtidos para solo sob cultivo, na comparação entre resultados obtidos com os dois tipos de sondas. Decorre disto que se pode afirmar que as sondas produzidas artesanalmente equivalem às sondas originais, para medidas de umidade no campo, sem quaisquer restrições.

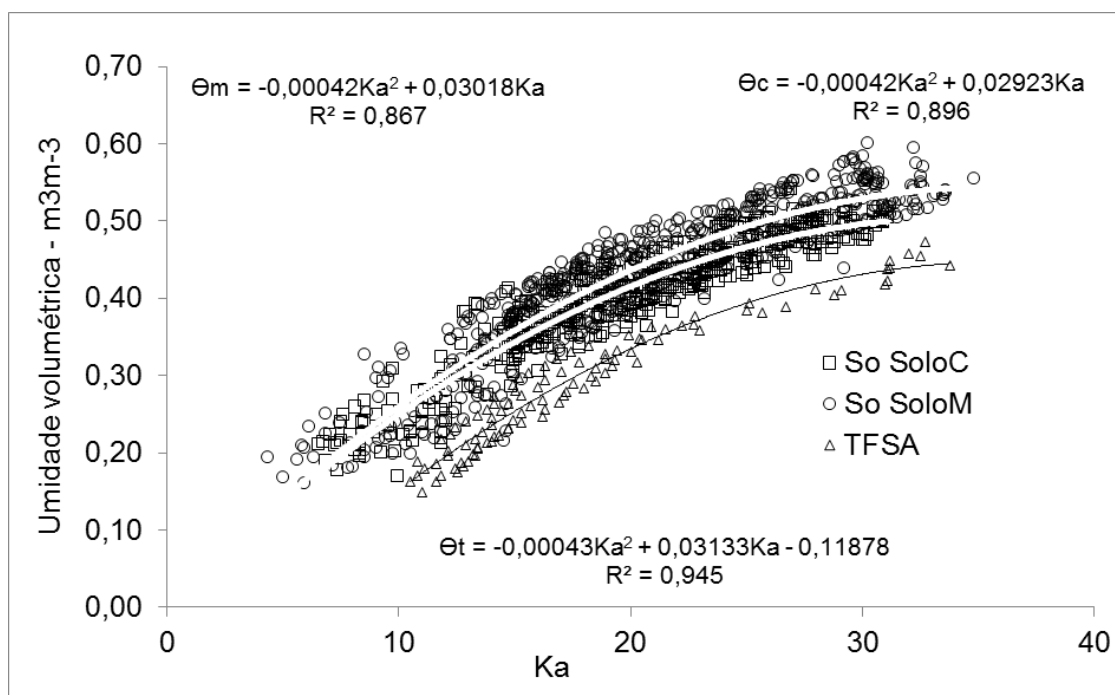


Figura 10 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas originais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração.

Para os dois tipos de sondas pode-se observar que as curvas referentes ao solo sob mata e para a TFSA mostram um paralelismo destacado, com uma defasagem praticamente constante entre elas, expressa pelo termo independente do modelo de segundo grau, da ordem de  $0,119\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , conforme já destacado. Este paralelismo está descrito matematicamente pela semelhança entre os coeficientes dos termos de segundo e de primeiro grau, para os modelos obtidos para solo sob mata e para TFSA, com os dois tipos de sonda.

Para o solo sob cultivo, o coeficiente do termo de segundo grau, obtido com os dois tipos de sonda (Figuras 9 e 10), são também muito semelhantes.

Os valores do coeficiente do termo de primeiro grau, no entanto, embora praticamente idênticos entre as duas sondas, são menores que os obtidos para solo sob mata, os quais são praticamente idênticos ao valor obtido para o termo de primeiro grau para TFSA. Isto evidencia a tendência dos modelos para solo sob cultivo estarem ligeiramente abaixo do obtido para solo sob mata e não serem paralelos a estes modelos.

Uma vez que os modelos ajustados para a curva de calibração entre umidade volumétrica e constante dielétrica do solo apresentaram as características discutidas, dentre as

quais se destaca uma diferença expressiva entre o que foi obtido para amostras indeformadas, em comparação com o obtido para amostras deformadas, buscou-se analisar as curvas tomando-se os valores de umidade gravimétrica.

Esta avaliação teve por base a possibilidade de que os valores de densidade do solo mais elevados obtidos para as condições de campo que para as condições de laboratório (Tabelas 2 e 3), poderiam influenciar significativamente esta defasagem entre as curvas, para os dois contextos.

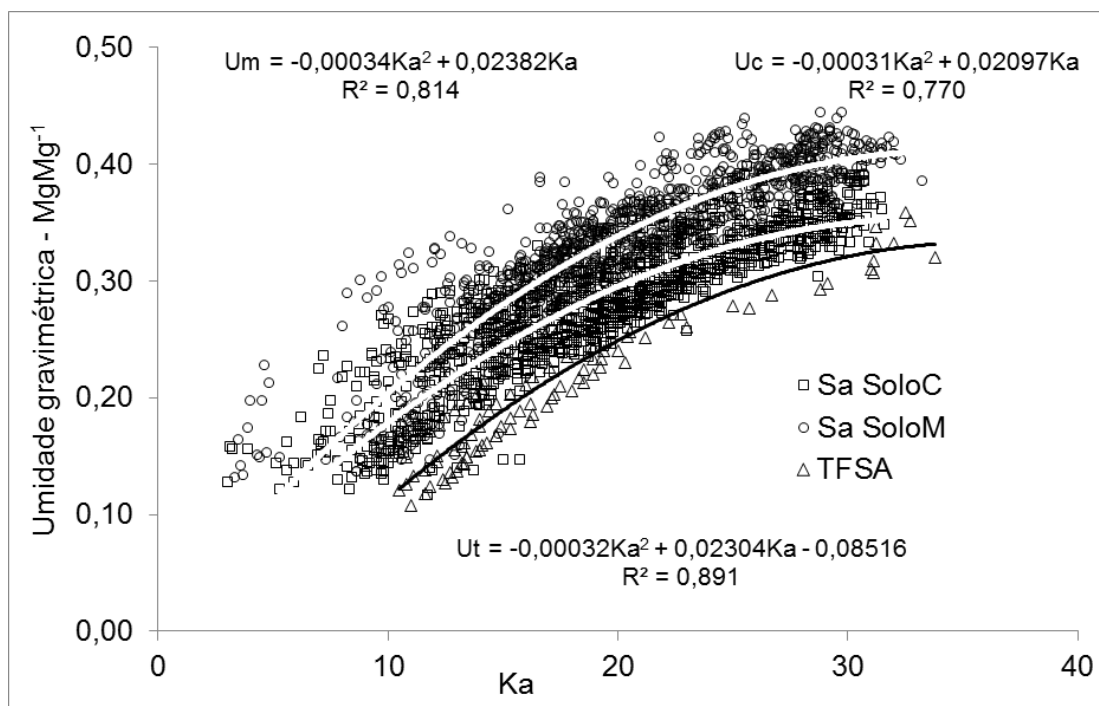


Figura 11 – Umidade gravimétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração.

Desta forma, foram ajustados os modelos para a condição de solo sob cultivo e solo sob mata, para as sondas artesanais (Figura 11) e para as sondas originais (Figura 12), os quais foram comparados com o modelo ajustado para TFSA, obtido unicamente com sondas originais, conforme Gonçalves et al. (2011). Pode-se observar na Figura 11 que os coeficientes dos modelos ajustados diferenciam-se daqueles obtidos para o ajuste considerando a umidade volumétrica (Figura 9), mas a posição relativa das curvas não se altera, permanecendo conforme

anteriormente discutido. Assim, embora a defasagem entre as duas condições, campo e laboratório, seja menor que o obtido com umidade volumétrica, permanece ainda proporcionalmente elevada.

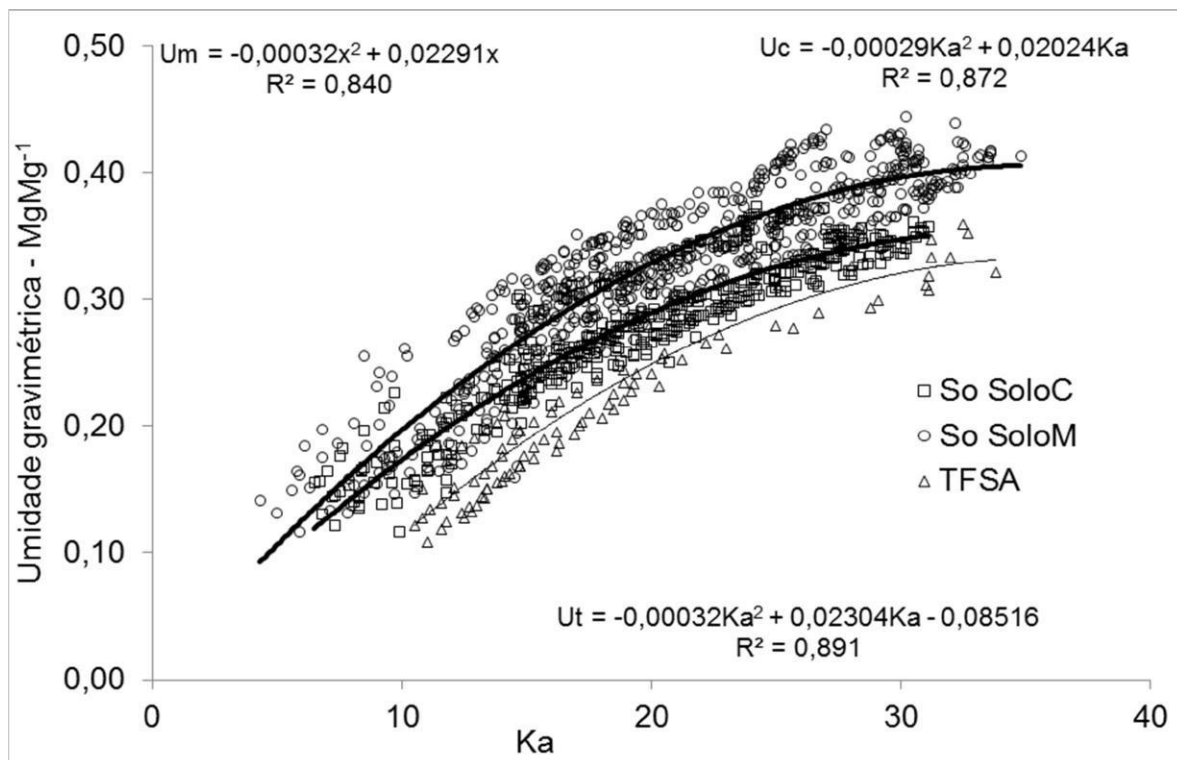


Figura 12 – Umidade gravimétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas originais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA e modelos ajustados para as curvas de calibração.

De acordo com a Figura 12, pode-se observar que situação semelhante à verificada na Figura 11 ocorreu, também, para os resultados obtidos com as sondas originais. O emprego da umidade gravimétrica para o ajuste de modelos às curvas de retenção não produziu melhorias substanciais que justificassem esta opção, uma vez que a posição relativa entre as curvas, como já discutido com base na umidade volumétrica (Figura 10), permaneceu a mesma. Destaca-se apenas que os valores da defasagem entre as curvas, em relação à obtida para a TFSA, tornou-se um pouco menor. Isto, no entanto, produz avanço de qualidade pouco expressivo, em termos práticos.



#### 4.5. Comparação com o modelo proposto por topp (1980).

O modelo proposto por Topp et al. (1980) tem sido empregado como uma referência desde que foi proposto. Trata-se de um modelo polinomial de terceiro grau, com coeficientes fixados pelos autores. Na Figura 13 são mostrados os modelos ajustados a partir dos dados obtidos com as sondas artesanais, conforme a Figura 11, e a curva correspondente a este modelo.

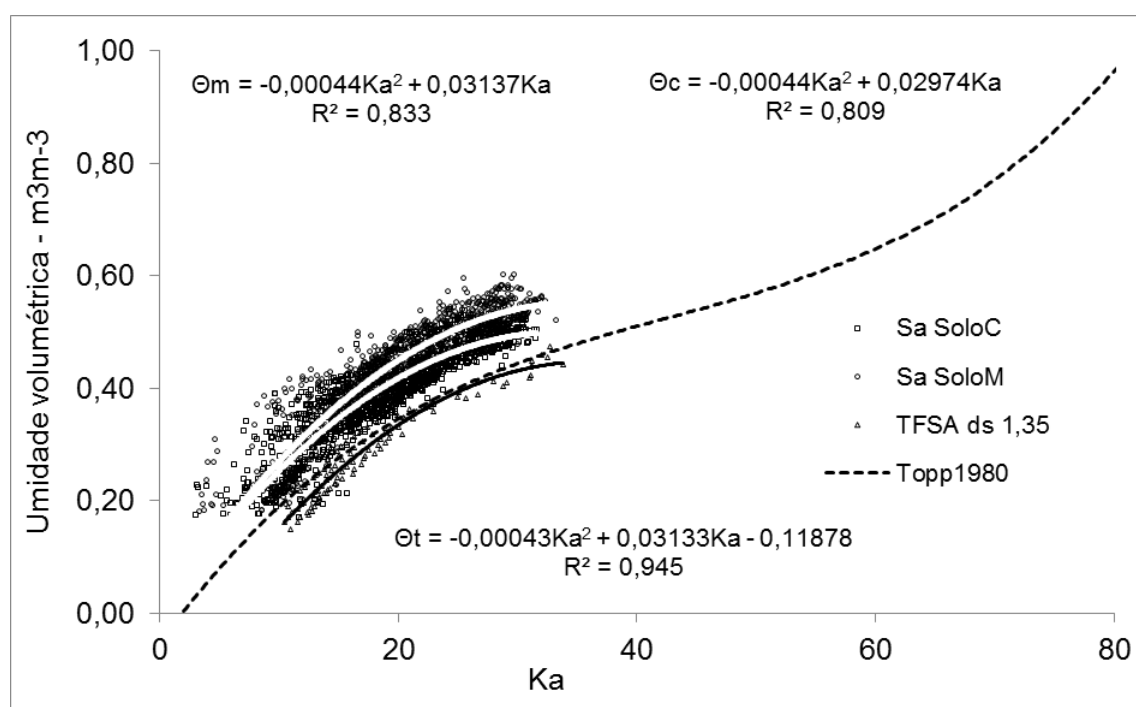


Figura 13 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA, modelos ajustados para as curvas de calibração e modelo de Topp et al. (1980).

Pode-se observar na Figura 13 que o modelo de Topp foi estabelecido pelos autores para um domínio de valores de  $K_a$  variando entre cerca de 3 (solo seco) até o valor de 81 (água pura). Os valores medidos no solo mineral com o qual se trabalhou, nas diferentes condições estudadas, abrangem apenas uma pequena parte deste domínio, com valores de  $K_a$  inferiores a 40. Nesta região, o modelo de Topp assume uma configuração muito semelhante ao modelo quadrático com concavidade negativa, ajustado para as três condições avaliadas. Nesta região, o coeficiente do termo de terceiro grau do modelo, cujo valor é da ordem de  $10^{-6}$ , exerce pouca influência no valor

final calculado para a umidade volumétrica, fazendo com que este modelo seja, nesta região, equivalente aos modelos quadráticos ajustados. Para valores de  $K_a$  entre 20 e 30, conforme pode ser observado na Figura 13, o modelo de Topp praticamente coincide com o modelo quadrático ajustado para a TFSA, ficando distante dos valores obtidos em campo. Nesta faixa de valores, o coeficiente do termo de terceiro grau do modelo contribui com o valor final da umidade com valores na faixa entre 0,034 e 0,116  $m^3m^{-3}$ , evidenciando sua pequena relevância nesta faixa de valores, ou seja, o modelo equivale a um modelo quadrático, nesta região.

Desta forma, torna-se imprescindível reconhecer que para a maioria dos solos minerais, os valores de umidade volumétrica raramente superam 0,6  $m^3m^3$ , mesmo na saturação, fazendo com que o termo de terceiro grau deste modelo tenha capacidade muito restrita em contribuir para uma melhor estimativa da umidade, por meio da TDR.

#### **4.6. Ajuste de modelos completos, incluindo leitura em água**

Assim como estabelecido por Topp et al. (1980), os quais incluíram o valor teórico referente à leitura do TDR em água pura, ou seja,  $K_a = 81$  para  $\Theta = 1$  (100% água no meio), alguns autores, tais como Gubiani et al. (2015) têm proposto a inclusão deste ponto junto aos dados experimentais, para, supostamente, melhorar o ajuste. Este procedimento foi executado para os conjuntos de dados experimentais, ajustando-se modelos completos, de terceiro grau, a eles. Os coeficientes dos modelos obtidos estão apresentados na Tabela 4 e as curvas referentes a eles na Figura 14.

A comparação dos valores de  $R^2$  obtidos com estes modelos e com aqueles obtidos por meio do ajuste de um modelo quadrático incompleto, apresentados na Figura 9, para os dados de campo, revela que os valores são praticamente iguais, evidenciando que a ambos explicam, de forma praticamente idêntica, a variabilidade intrínseca aos dados. O mesmo se pode verificar em relação à TFSA. Esta variação de valores do coeficiente de determinação situa-se entre 1 e 2% apenas. Destaca-se na Tabela 4 que a ordem de grandeza dos valores dos coeficientes é a mesma que a identificada para o modelo de Topp, embora seus valores sejam diferentes. Isto revela uma semelhança entre os modelos, a qual pode ser visualizada na Figura 14.

Tabela 4 – Coeficientes dos modelos completos ajustados ( $\Theta = a + bKa + cKa^2 + dKa^3$ ) e correspondente coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os conjuntos de dados estudados e coeficientes do modelo de Topp para comparação.

Modelo:	a	b	c	d	$R^2$
Topp	-5,30E-02	2,92E-02	-5,50E-04	4,30E-06	
Sa SoloM	5,22E-02	2,75E-02	-4,63E-04	3,30E-06	0,843
Sa SoloC	8,12E-02	2,22E-02	-3,42E-04	2,60E-06	0,832
TFSA	-1,76E-01	4,04E-02	-8,82E-04	7,00E-06	0,969

A observação da Figura 14 permite afirmar que, assim como discutido para o modelo de Topp., para os modelos ajustados aos dados experimentais incluindo o ponto teórico referente à água, o pequeno valor do coeficiente do termo de terceiro grau faz com que este se apresente de forma quase irrelevante, na região na qual os pontos experimentais foram obtidos, ou seja, para valores de umidade volumétrica abaixo de 60% , associados a valores de Ka abaixo de 35. Destaque para o modelo completo para TFSA, com valores mais elevados para os coeficientes, exceto para o intercepto, o que está associado às curvaturas mais acentuadas do gráfico, o que tornou possível o modelo completo coincidir com o modelo reduzido (segundo grau completo, conforme Figuras 9 e 14), previamente ajustado. Para este material, pode-se observar, portanto, que a inclusão do ponto teórico não melhorou a qualidade do ajuste do modelo, na faixa de valores experimentais.

Para os dados obtidos em campo, tanto para solo sob mata quanto para solo sob cultivo, pode-se observar, na Figura 14, que a curvatura do modelo completo é ligeiramente suavizada, em relação aos modelos de segundo grau incompletos ajustados (Figuras 9 e 14), na faixa de valores experimentais. Na região intermediária dos valores, ou seja, para Ka entre 10 e 30, pode-se verificar visualmente a proximidade entre os modelos, para cada conjunto de dados. No entanto, para Ka acima de 30 e, principalmente para valores abaixo de 10, verifica-se que cada modelo completo afasta-se do seu correspondente modelo quadrático, sugerindo uma perda de qualidade de estimativa da umidade, nestas regiões.

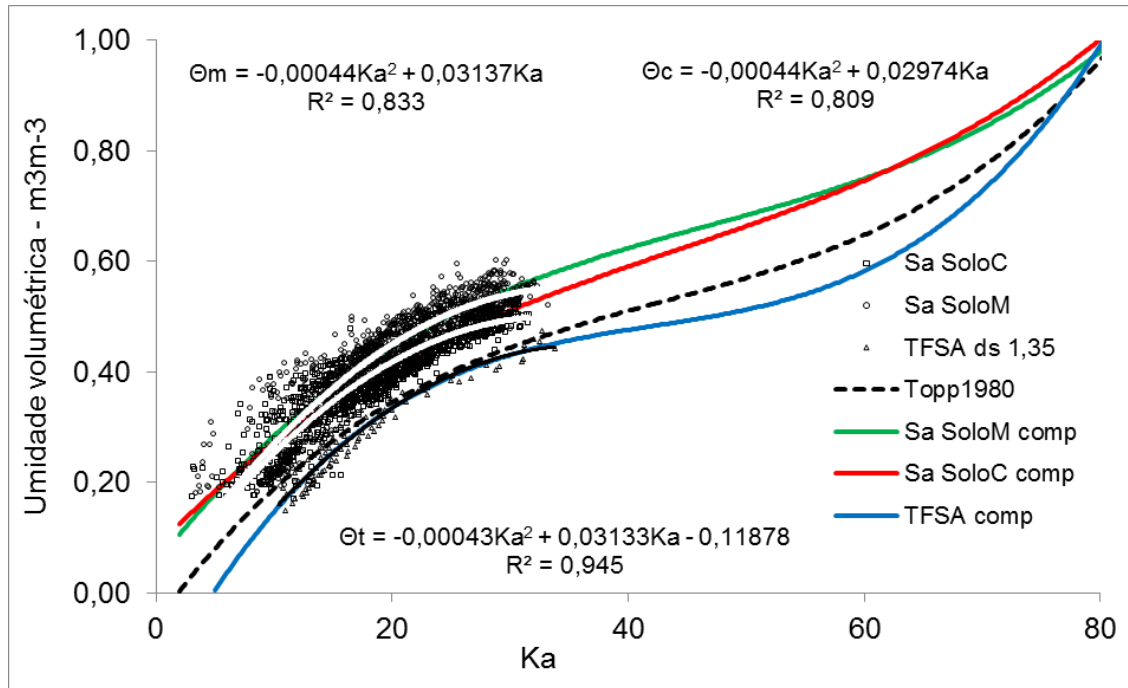


Figura 14 – Umidade volumétrica e correspondente constante dielétrica obtidos com sondas artesanais para o solo sob mata (Solo M), solo sob cultivo (Solo C) e para TFSA, modelos ajustados para as curvas de calibração, modelo de Topp et al. (1980) e modelos completos (incluindo ponto referente à água).

Para avaliar a qualidade da estimativa de umidade com os modelos avaliados, procedeu-se à análise dos resíduos obtidos (estimado – observado) e se comparou as estimativas obtidas com o emprego de ambos os modelos, para cada conjunto de dados. A análise comparativa das estimativas está apresentada na Figura 15. Pode-se verificar que, para a TFSA, os dois modelos foram coincidentes, em toda a faixa de valores experimentais. As estimativas com o modelo completo (Estimativa comp.), comparadas com as estimativas obtidas com o modelo incompleto (Estimativa) situam-se sobre a reta 1:1. O modelo linear ajustado a elas apresenta inclinação unitária e intercepto praticamente nulo, com  $R^2$  de 0,9997. Isto permite considerar que, em termos práticos, os modelos são idênticos. Ou seja, não há qualquer benefício em se adicionar o ponto teórico referente à água, neste ajuste.

Para o solo sob mata, a análise comparativa das estimativas detalha o que foi visualizado na Figura 14, ou seja, nas extremidades da faixa de valores, o modelo completo foi menos capaz de descrever as observações experimentais, fazendo com que os pares de valores se afastem da reta 1:1, como pode ser observado na Figura 15 identificado por meio dos coeficientes do modelo

linear também apresentado. Neste caso, para a condição próxima à saturação do solo, o modelo completo tende a superestimar a umidade, o que ocorre também, de forma mais intensa, nos baixos valores de umidade. Para valores de  $K_a$  acima de 10, o que corresponde em média a valores de  $\Theta$  acima de  $0,25\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , o erro relativo percentual entre as duas estimativas fica inferior a 5%, o que permite aceitar a equivalência entre os modelos. Abaixo disto, no entanto, este erro cresce substancialmente, superando 20%.

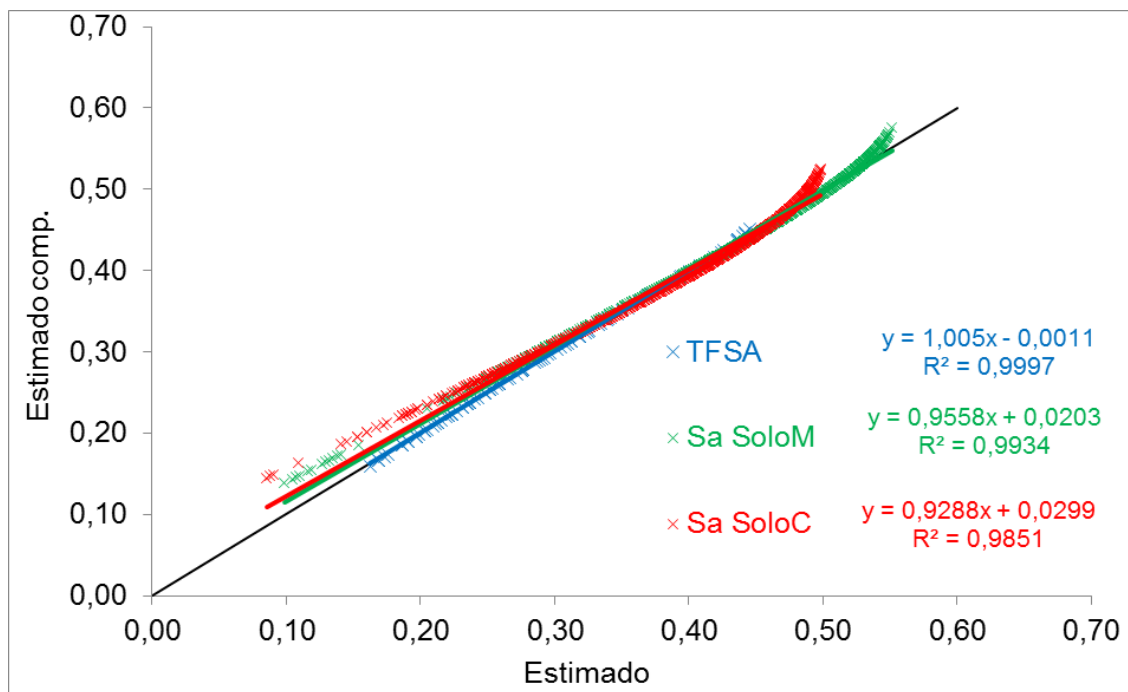


Figura 15 – Análise dos resíduos gerados pelo modelo de segundo grau em comparação com os do modelo completo (incluindo ponto teórico referente à água).

Situação muito semelhante ocorre para o solo sob cultivo, porém de forma um pouco mais intensa. Pode-se observar na Figura 15 que as extremidades da distribuição dos pares de valores de estimativas para este conjunto de dados se afasta ainda mais da reta 1:1. Isto é evidenciado pelo modelo linear ajustado, também apresentado nesta Figura 15. Novamente, para a faixa de valores de  $K_a$  entre 10 e 35, correspondentes a valores de umidade entre  $0,25$  e  $0,50\text{m}^3\text{m}^{-3}$ , aproximadamente, os erros relativos percentuais entre as estimativas referentes aos dois modelos em questão situam-se abaixo de 5%, tornando viável aceitar a equivalência destes. Fora desta faixa, sobretudo em direção ao secamento do solo, estes valores se tornam mais elevados,

evidenciando que o emprego do modelo completo contribuiu para a redução da qualidade da estimativa, em relação ao modelo incompleto.

Desta forma, pode-se sintetizar constatando que, para as condições estudadas, o procedimento de se adicionar, aos dados obtidos experimentalmente, o ponto correspondente à condição teórica referente à água pura, ou seja, ( $K_a = 81; \Theta = 1$ ), tem potencial restrito de melhoria do modelo de calibração. Este ponto estará sempre muito distante da nuvem de pontos experimentais obtidos para o solo em questão, em se tratando de um solo mineral. Isto faz com que cerca de 50% da faixa de valores (entre  $\Theta$  igual a 0,0 e  $0,5\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) contenha o conjunto de dados experimentais, enquanto a outra parte (aproximadamente a outra metade da faixa), seja representada por um único ponto, na sua extremidade. Melhor resultado tenderá a ser obtido ajustando-se um modelo a um conjunto amplo e representativo de pontos experimentais, obtidos para o solo em questão, na faixa de valores de umidade que efetivamente ocorrem em condições naturais ou mesmo sob ações antrópicas que promovam alterações em sua estrutura.

#### **4.7. Incorporação da densidade do solo ao modelo de calibração**

A incorporação da densidade do solo ao modelo de calibração feita por Gonçalves et al. (2011) possibilitou o incremento de qualidade da estimativa de umidade volumétrica do solo, para o solo em questão. O ajuste do modelo geral empregado pelos autores foi realizado para o conjunto de dados oriundos de solo sob mata e sob cultivo, obtendo-se os coeficientes apresentados na Tabela 5. A análise de variância da regressão permitiu verificar que, para todos os coeficientes apresentados, obteve-se um nível de significância expresso por  $p < 0,05$ .

Observa-se que o coeficiente  $b$  do modelo apresentou o maior valor de  $p$ , da ordem de 0,036, revelando o efeito pouco significativo da variável  $d_s$  para explicar a variabilidade experimental. Não obstante, foi significativo em nível inferior a 5%, o que permite afirmar que a  $d_s$  contribui para explicar a variabilidade, permanecendo no modelo. Os demais coeficientes, por incorporarem o valor de  $K_a$ , em primeiro e em segundo grau, são altamente significativos ( $p < 0,0001$ ).

O fato de que  $d_s$  no campo apresentou uma faixa de valores entre 1,28 e  $1,46\text{Mgm}^{-3}$  está associado a este nível de significância baixo, ou seja, a variável  $d_s$  foi de pouca expressão para explicar a variação dos valores. Gonçalves et al. (2011) trabalharam com uma faixa de valores de

ds muito mais ampla, entre 0,9 e 1,38  $\text{Mgm}^{-3}$ , o que proporcionou a eles obterem resultados expressivamente diferentes do verificado no presente trabalho, com o efeito de ds sendo altamente significativo.

Tabela 5 – coeficientes do modelo geral:  $a + b(ds) + c(Ka) + d(dsKa) + e(Ka^2) + f(dsKa^2)$  ajustado ao conjunto de dados obtidos em campo, para a calibração da TDR com incorporação do efeito da densidade do solo.

<u>coeficiente</u>	<u>valor</u>	<u>p &lt;</u>
a	-0,2606	
b	0,2234	0,0363
c	0,0840	0,00001
d	-0,0434	0,0001
e	-0,0017	0,00001
<u>f</u>	<u>0,0010</u>	<u>0,0003</u>

Com o propósito de avaliar comparativamente a qualidade dos modelos ajustados, com e sem a incorporação de ds, apresenta-se a análise de resíduos destes na Figura 16. Pode-se observar nesta Figura 16 a nuvem de pontos oriunda da comparação entre valores estimados e valores observados, pelo modelo com a incorporação da ds e sem esta, ou seja, pelo modelo quadrático incompleto, apresentado na Figura 6. Pode-se constatar que os dois modelos geram resultados muito semelhantes, o que torna possível considera-los, em termos práticos, equivalentes. Verifica-se uma ligeira melhoria de qualidade das estimativas feitas pelo modelo envolvendo ds, no trecho mais seco de solo, ou seja, para valores de umidade abaixo do ponto de murcha para este solo, correspondente a  $0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , conforme Gonçalves et al. (2011). Estes autores também apresentam o valor de  $0,44 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  como sendo o correspondente à capacidade de campo para o solo em questão. Verifica-se na Figura 16 que, na faixa de água disponível, assim como para a faixa entre capacidade de campo e a saturação, o TDR apresentou uma dispersão muito inferior que aquela verificada para solo muito seco, ou seja, abaixo do ponto de murcha.

Desta forma, fica evidente a perda de qualidade das estimativas de umidade, feitas com a TDR, para solo muito seco. Como esta faixa de valores de umidade, abaixo do PMP, é de menor interesse do ponto de vista agrônomo, isto não tende a se caracterizar como um fator limitante

ao emprego da técnica. Para compreender melhor as diferenças entre os modelos, apresenta-se na Figura 17 os valores estimados por ambos modelos.

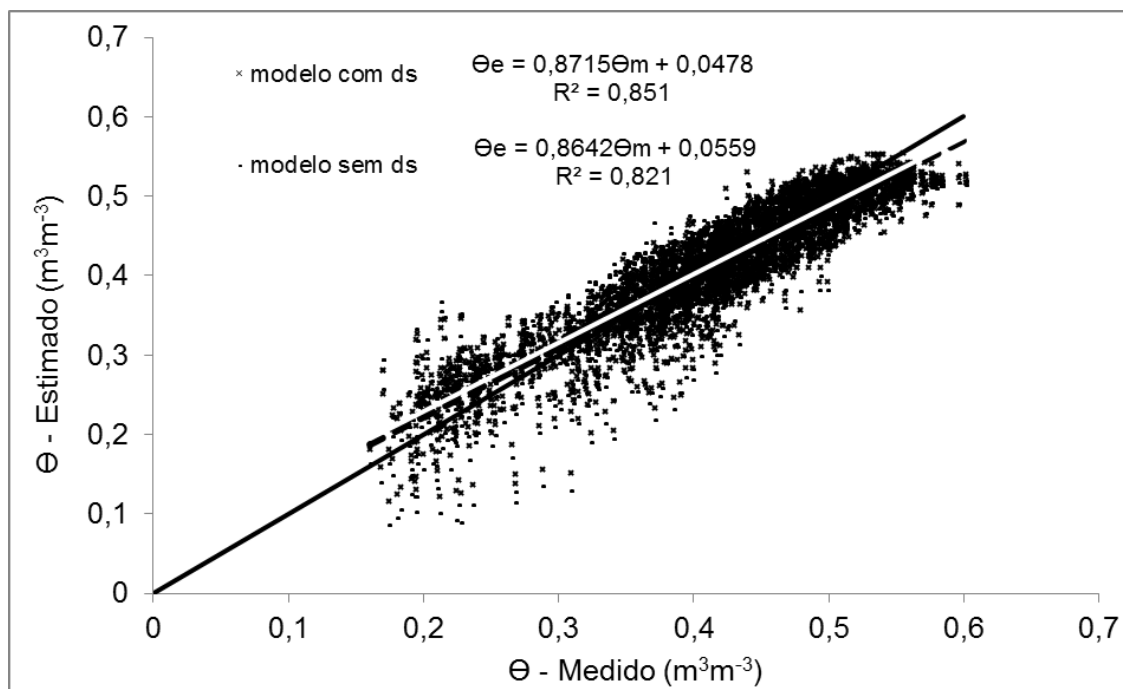


Figura 16 – Valores medidos e estimados de umidade volumétrica do solo, com o emprego do modelo quadrático incompleto e com o modelo incorporando a densidade do solo (ds).

Pode-se observar na Figura 17 que os dois modelos apresentam estimativas muito próximas, na faixa de valores de umidade acima do PMP. Mesmo abaixo deste ponto, para umidade volumétrica do solo, nos dois cenários estudados, acima de  $0,23 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , o que corresponde a valor de  $K_a$  da ordem de 10 unidades, a diferença entre as estimativas é muito pequena, expressa por um erro relativo percentual inferior a 5%. Destaca-se que quanto mais baixa é a umidade do solo, mais expressiva a subestimativa feita pelo modelo sem a incorporação da ds. Para valores de  $K_a$  abaixo de 10, a qualidade da estimativa decresce bruscamente, sendo recomendada a não utilização da TDR na avaliação da umidade, nestas circunstâncias.



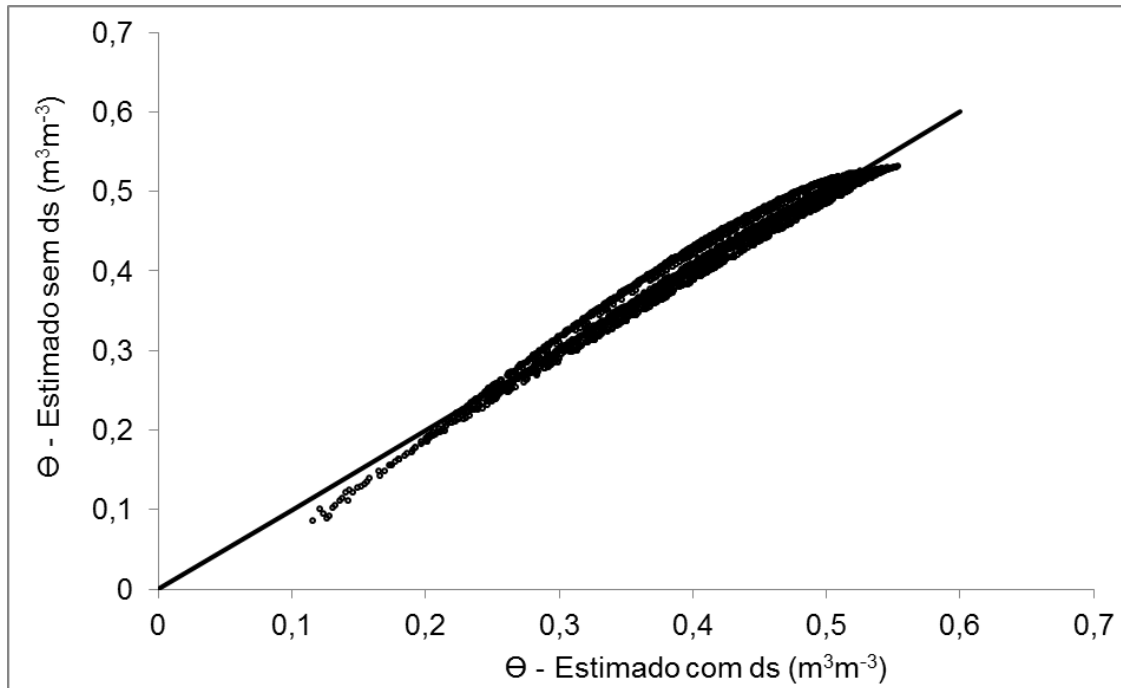


Figura 17 – Valores estimados por ambos os modelos, sem e com a incorporação da ds.

A distribuição dos valores apresentados na Figura 17 permite visualizar que a incorporação da densidade do solo no modelo de calibração, nas condições estudadas, pouco acrescenta, em termos de qualidade de estimativa realizada, em relação ao modelo sem esta incorporação.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- 1 – As sondas artesanais promoveram a obtenção de resultados equivalentes às sondas originais, tanto nas condições de campo como para TFSA.
- 2 – Os dois ambientes avaliados em campo, solo sob cultivo e solo sob mata podem ser associados a um único modelo de calibração para TDR.
- 3 – Uma abordagem mais detalhada permite identificar modelos distintos para as duas condições estudadas. Neste caso, solo sob mata apresenta maiores valores de umidade para um determinado valor de  $K_a$  que solo sob cultivo. Esta diferença cresce à medida que se eleva a umidade do solo. Para umidades inferiores ao ponto de murcha, esta diferença torna-se insignificante.
- 4 – A obtenção de um modelo de calibração a partir de TFSA em laboratório pode levar à subestimativa do valor de umidade em amplitude semelhante à faixa de água disponível para este solo. Assim, a calibração em campo mostra-se necessária.
- 5 – A geração de um modelo de calibração que relacione  $K_a$  com a umidade gravimétrica, em substituição à volumétrica, nas condições estudadas, não apresentou potencial de promover melhorias substanciais de estimativa, para a condição de campo.
- 6 – O modelo proposto por Topp et al.(1980) mostrou-se adequado para descrever a calibração da TDR em TFSA, não sendo adequado para a descrição dos modelos identificados para as condições de campo.
- 7 - Adicionar aos dados experimentais o ponto teórico referente à água pura ( $K_a = 81$ ;  $\Theta = 1$ ) não se mostra uma opção adequada para a melhoria da qualidade do modelo de calibração.
- 8 – Incorporar a densidade do solo ao modelo de calibração geral não incrementou a qualidade da estimativa realizada, para avaliar a umidade nas condições de campo estudadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAMI, M. H.; MARQUES, O. J.; BLAINSKI, E.; GUIMARÃES, R. M. L.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Alternativas na construção de sondas de tdr para estudo de variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA 2006. João Pessoa – PB. 2006.
- ANDRADE, C. L. T.; COSTA, E. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v.7, n.1, p.173-176, 2003.
- ASGARZADEH, H.; MOSADDEEGHI, M. R.;DEXTER, A. R.; MAHBOUBI, A. A.; NEYSHABOURI, M. R. Determination of soil available water for plants. **Geoderma**,v.226-227, p. 8-20, 2014.
- BATISTA, L. S.; COELHO,E. F.; PEREIRA, F. A. C.; SILVA, M. G.; GOMES FILHO, R. R.; GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com tdr para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.10, n.2, p. 522 - 532, 2016.
- BATISTA, W. R. **Avaliação das técnicas tdr (reflectometria por domínio do tempo) e moderação de nêutrons, na determinação do teor de água em diferentes classificações de solo**. 2004. 118 p. Dissertação (Mestrado em energia na agricultura)- Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade estadual paulista Júlio de mesquita filho-Unesp. Botucatu, 2004.
- BECKETT, C, T. S.; GLENN,D.; BRADLEY,K; GUZZOMI,A.L.;MERRITT,D.; FOURIE, A.B. Compaction conditions greatly affect growth during early plant establishment. **Ecological Engineering**, v. 106, p. 471–481, 2017.
- BITTELLI, M., SALVATORELLI, F.; PISA, P. R. Correction of TDR-basead soil water content measurements in conductive soils. **Geoderma**, v. 143, p. 133-142, 2008.
- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A. C. A.;TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, .V.;GUIMARÃES, R. M. L. Intervalo hídrico ótimo num nitossolo vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 33, p. 273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.975-983, 2008.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L.; NANNI, M. R. Qualidade Física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do Solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 36, n. 1, p.79-87. 2012.

BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; Müller, M. M. L. Infiltração de água no solo em um latossolo vermelho da região sudoeste dos cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.36, n. 6, p. 1845-1853. 2012.

CALAMITA, G.; BROCCA, L.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; LAPENNA, V., MELONE, F.; MORAMARCO, T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. **Journal of Hydrology**. v.454-455 p.101-112. 2012.

CALDERÓN, V. J. V. **Interpretação dos resultados de ensaio TDR para a determinação do teor de umidade dos solos**. 118p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Universidade de São Paulo. 2010.

CARVALHO, M. A.; RUIZ, H. A.; COSTA, L. M.; PASSOS, R. R; ARAUJOS, C. A. S. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas cobertura dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 10, p.1010-1016. 2014.

CATALDO, A.; BENEDETTO, E, D.; CANNAZZA, G.; MONTI, G.; DEMITRI, C. Accuracy improvement in the TDR-based localization of water leaks. **Results in Physics**, v.6, p. 594-598. 2016.

CERNY, R. Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review. **Measurement**, v. 42, n.3, p. 329-336. 2009.

CHEN, R.; CHEN, Y.; WEI CHEN, W.; CHEN, Y. Time Domain Reflectometry for water content measurement of municipal solid waste. **Environmental engineering Science**, v. 29. n. 6, P.486-493, 2012.

- CHUNG, C.; LIN, C.; WU, I.; CHEN, P.; TSAY, T. New TDR waveguides and data reduction method for monitoring of stream and drainage stage. **Journal of Hydrology**. p. 346–351. 2013.
- COELHO, E. F. ; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a tdr e a multiplexadores em três tipos de solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 30, p. 23-30. 2006.
- COELHO, E. F.; ANDRADE, C. L. T.; OR, D.; LOPES, L. C.; SOUZA, C. F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.81-87. 2001.
- COELHO, E. F.; CALDAS, R. C.; SANTOS, D. B.; LEDO, C. A. S. Número e espaçamento entre hastes de guia de onda para medida da umidade do solo com TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.215-220, 2003.
- COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P.; VELLAME, L. M. Sondas de TDR artesanais de três hastes para estimativa da umidade do solo. **Circular técnica Embrapa**. Cruz das Almas, BA. 2016.
- COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. Sonda de TDR para a estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.475-480, 2005.
- COELHO, S. L. ; TEIXEIRA, A. D. S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial água no solo. **Revista Engenharia Agrícola**. v.24, n.3, p.536-545, 2004.
- CRISTI, F.; FIERRO, V.; SUÁRREZ, F.; MUÑOZ, J. F.; HAUSNER, M. B. A TDR-waveform approach to estimate soil water content in electrically conductive soils. **Computers and Electronics in Agriculture**,v. 121, p.160-168, 2016.
- CUNHA, E. Q.; STONE, MOREIRA, A. A. J.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONE, D. A.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.35, p. 589-602. 2011.
- DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resouce management. **Journal of Hydrology**,.v. 458-459, p. 110-117. 2012.

ELAIUY, M. L. C.; SATO, L. M.; VARALLO, A. C. T.; SOUZA, C. F. Desenvolvimento e avaliação de sonda de TDR para o manejo racional da água em substratos utilizados na produção de mudas florestais. **Revista Ambiente e Água**, v. 4, n. 1, p.117-131, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Tensiômetro: Dispositivo prático para o controle da irrigação**. Circular técnica, Planaltina.1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. revista e atualizada. Rio de Janeiro, 1997.

FREITAS, W. A.; CARVALHO, J. A.; BRAGA, R. A.; ANDRADE, M. J. B. Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.16, n.3, p.268–274, 2012.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; LANZANOVA, M. E.; TASCA, A. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Revista Scientia Agraria**, v. 18, n.2, p. 86-96. 2017.

GOMES, R. L. R.; SILVA, M. C.; COSTA, F. R.; LIMA JUNIOR, A. F.; OLIVEIRA, I. P.; SILVA, D. B. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Faculdade Montes Belos**. v. 8, n. 5, 2015, p.72-139. 2015.

GONÇALVES, A. C. A.; TRINTINALHA, M. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. et al. Influência da densidade do solo na estimativa da umidade em um Nitossolo Vermelho Distroférrico, por meio da técnica TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, n.35. p. 1551-1559. 2011.

GUARIZ, H. R. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v.4, n. 2; p. 709-716, 2009.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; GELAIN, N. S. Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no solo. **Revista Ciência Rural**, v.45, n.8, p.1412-1417, 2015.

GUIMARAES, R. M. L., TORMENA, C. A.; BLAINSKI, E. ; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1512-1521. 2013.

- HEATHMAN, G. C.; STARKS, P.; AHUJA, L. R.; JACKSON, T. J. Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil water content. **Journal of Hydrology**, v.279, p. 1–17. 2003.
- HOLUBEK, M. ; KORONTHALYOVA, O. Comparison of TDR and X-ray method for determining moisture transport parameters. **Energy Procedia**, v.132, p. 723-728. 2017.
- IZVOLT, L.; DOBES, P.; MECÁR, M. Calibration of TDR test probes for measuring moisture changes in their constructions layers of the railway line. *Procedia engineering*, v. 161, p. 1057-1063. 2016.
- JONES, S. B. ; OR, D. ; Modeled effects on permittivity measurements of water content in high surface area porous media. **Physica B**, v. 338, p. 284-290, 2003.
- JONES, S. B. ; WRAITH, J. M. ; OR, D. Time domain reflectometry measurement principles and applications. **Hydrol Process**, v. 16, p.141–153, 2002.
- KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. ; MINELLA, J. P. G. Dielectric constant obtained from tdr and volumetric moisture of soils in southern brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34. p. 649-658, 2010.
- LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Revista Ciência Rural**, v.37, n.4, p.1166-1169, 2007.
- LIMA, J.R.S.; SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D. ; SILVA, I. F.; CORRÊA, M. M.; LIRA, C. A. B. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Amarelo cultivado e sob mata nativa no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.9, n.4, p.599-605, 2014.
- LINMAO, Y.; LONGQIN, X.; GUANGZHOU, Z.; HAIBO, C.; LIKUAI, S; ZHIGANG, W.; GOUHE, Y.; YANBIN, W., SUJUN, N.; JIN, Y.; QI, JIN. FDR Soil Moisture Sensor for Environmental Testing and Evaluation. **Physics Procedia** , v.25, p. 1523 – 1527. 2012.
- LIU, X. Evaluation of the Heat-Pulse Technique for Measuring Soil Water Content with Thermo-TDR Sensor. **Procedia Environmental Sciences**, v.11,p. 1234-1239. 2011.
- LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, A. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.9, n.1, p.9-19, 2010.

- MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; DE MARIA, I. C. Sonda espiral de tdr para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, p.191-198, 2007.
- MATIAS, S. S. R., BORBAS, J. A.; TICELLI, M.; PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes usos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 3, p. 331-338, 2009.
- MEDEIROS, J. D. F; DOS REIS, N. M.; CLARKE, R. T. Calibração de Sondas do TDR em um Latossolo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.12, n. 2. p.19-25. 2007.
- MILANI, D. I. C.; TAVARES, M. H. F.; SCHERPINSK, C. Calibração de sondas de TDR em condições de laboratório. **Revista Ambiente e Água**, v.3, n.1, p.68-75, 2008.
- MOUAZEN, A. M. ; AL-ASADIB, A. R. Influence of soil moisture content on assessment of bulk density with combined frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy under semi field conditions. **Soil & Tillage Research**, v. 176, p.95–103, 2018.
- NAKONIECZNA, A.; KAFARSKI, M.; WILCZEK, A.; SZYPŁOWSKA, A.; JANIK, G.; ALBERT, M.; SKIERUCHA, W. Detection of atmospheric water deposits in porous media using the TDR technique. **Sensors**, v. 15, p. 8464-8480, 2015.
- NETTER, J.; WASSERMAN, W. & KUTNER, M.H. Applied linear regression models. 2.ed. Home wod: R .D. Irwin, 1989. 245p.
- NUNES, L. A. P.; DIAS, L. E. ; JUCKSCH, I. ; BARROS, N. F. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de minas gerais. **Bioscience Journal**, v.26, n. 1, p. 71-78. 2010.
- NUNES, M. S. ; ROBAINA, A. D. ; PEITER, DE VARGAS, F.; BRAGA, A.; BRAGAGNOLO, J. . Uso do tdr 300 na determinação da umidade volumétrica do solo para manejo da irrigação da soja safrinha. **Revista de Agricultura**. v.90, n.3, p. 250 - 255, 2015.
- OLIVEIRA, L. F. C.; ROQUE, C. G. Determinação da umidade do solo por micro-ondas e estufa em três texturas de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 4, p. 60-64, 2016.
- ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. p. 619-624. 2014.



OWUOR, S. O.; BUTTERBACH-BAHLA, K.; . GUZHAC, A. C.; JACOBSA, S.; MERBOLDB, L.; RUFINOD, M. C.; PELSTERB, D. E.; DÍAZ-PINÉSA,E.; BREUERG,L. Conversion of natural forest results in a significant degradation of soil hydraulic properties in the highlands of Kenya. **Soil & Tillage Research**, v.176, p.36-44. 2018.

PASTUSZKA, T.; KRZYSZCZAK, J.; SŁAWIN, C.; LAMORSKI, K. Effect of Time-Domain Reflectometry probe location on soil moisture measurement during wetting and drying processes. **Mensurament**, v. 49,p 182-186. 2014.

PEREIRA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M.; MARTINS, J. H. Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.306–314, 2006.

PORTUGAL, A. F.; DEL'ARCO, O.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, p. 575-585. 2010.

REDER, A.; RIANNA, G.; PAGANO, L. Calibration of TDRs and heat dissipation probes in pyroclastic soils. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 9, p. 171-179. 2014.

REINERT, D. J., REICHERT, J. M. Propriedades física do solo. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. 2006.

SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI, M., ANGELAKI, A.; EVANGELIDES, C.; BOTA, V.; TSIANOU, E.; FLOROS, N.Experimental determination of hydraulic conductivity at unsaturated soil column.Procedia Engineering. p. 83 – 90. 2016.

SÁNCHEZ–GONZÁLEZA, A.;CHAPELA–LARAA, M. ; GERMÁN–VENEGASB, E.; FUENTES-GARCÍAC, R. ; DEL RÍO-PORTILLAD, F. ; SIEBE, C. Changes in quality and quantity of soil organic matter stocks resulting from wastewater irrigation in formerly forested land. **Geoderma**, v.162, p. 99-107, 2017.

SANT'ANA, J. A. V. et al. Desempenho de sondas de tdr manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.4, p.1123-1129. 2012.

SANTOS, A. E. **Qualidade da estimativa da umidade, utilizando tdr, em função da composição granulométrica e da densidade do solo.**2013. 71f(Dissertação de mestrado) Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

SANTOS, M. R. ; ZONTA, J. H. ; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de tdr, **Revista Brasileira Ciencia do Solo**, v. 34, p. 299-307, 2010.

SERRARENS, D.; MACINTYRE, J. L; HOPMANS, J. W.; BOSSOI, L. H. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agricola**. v. 57, n. 2, p. 349-354, 2000.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M, E.; SILVA JUNIOR, J. J.; COLOMBO, A. LIMA. J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa agropecuária brasileira. Brasília**. v.47, n.2, p.277-286, 2012.

SONCELA, R. ; SAMPAIO, S. C.; VILAS BOAS, M. A.; TAVARES, M,H.F.; SMANHOTTO, A. Construction and calibration of tdr probes for volumetric water content estimation in a dystroferic red latosol. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.5, p.919-928. 2013.

SOTO, M. A. A.; KUMAYAMA, D. M.; CHANG, H. K. Calibração de um reflectômetro para estudos do fluxo de água em solo não saturado. **Revista Geociências**. v.26, n. 4, p. 357-368. 2007.

SOUZA, C. F, FOLEGATTI, M.; MTSURA, E. E. ; OR, D. Calibração da reflectometria no domínio do tempo (tdr) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p. 282-291. 2006b.

SOUZA, C. F. ; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.63-68, 2002.

SOUZA, C. F.; CIRILO, L. S.; BASTOS, R.G.; PERES, J.G.; OLIVEIRA, A. Sonda de tdr para a estimativa de umidade em bagaço de cana-de-açúcar. **Revista engenharia agricola**, v.36, n.1, p.24-35. 2016a.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. ; FOLEGATTI, M. V. ; COELHO, E. F.; OR, D. Sondas de tdr para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Revista Irriga**, v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006a.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B.; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas fdr e tdr para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com a técnicas de TDR e FDR. **Revista Irriga**, p. 26-42. 2016b.

SUCHORAB, Z.; WIDOMSKI, M.; LAGÓD, G.; BARNAT-HUNEK, D.; SMARZEWSKI, P. Methodology of moisture measurement in porous materials using time domain reflectometry. **Chem Didact Ecol Metrol**, v.19, p. 97-107. 2014.

TEIXEIRA, C. F. A. ; MORAES,S. O.; SIMONETE, M, A. Calibração de sondas de nêutrons: Amostras do solo versus tensiometria. **Revista de Ciência Agroveterinaria**. v.1, n.1, p.58-67, 2003.

TEIXEIRA, C. F. A. ; MORAES,S. O.; SIMONETE, M, A. Desempenho do tensiômetro, tdr e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**. p. 161-168. 2005.

TOLL, D. G.; LOURENÇO, S. D. N.; MENDES, J. Advances in suction measurements using high suction tensiometers. **Engineering Geology**, v. 165, p. 29–37. 2013.

TOMASSELLI J. T. G.; BACHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 36, n.9, p. 1145-1154. 2001.

TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. .Eletromagnetic determination of soil water content using TDR: I. Application to wetting fronts and steep gradients. **Soil Science Society of America Journal**. v. 46. p. 672-682. 1982a.

TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P. .Eletromagnetic determination of soil water content using TDR: II Evaluation of installation and configurations of parallel transmission lines. **Soil Science Society of America Journal**. v. 46. p. 678-684. 1982b.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines.1980.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines.1980.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C. , COSTA, A. C. S ; GONÇALVES A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C. A. ; RODOLFF, G. ; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.22, p 301-309. 1998.

TRINTINALHA, M. A. **Avaliação da técnica de reflectometria no domínio do tempo (tdr) na determinação de umidade em nitossolo vermelho Eutroférico**.2000. 64f. Dissertação de mestrado- Universidade Estadual de Maringá, Maringá 2000.

TRINTINALHA, M. A., GONÇAVES, S. C. A, TORMENA, C. A., COSTA, A. C. S., FOLEGATTI, M. V., FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Scientiarum: Agronomy**. v. 26, n. 3, p. 353-360, 2004.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, MARCOS VINÍCIUS; TORMENA, C. A. ; BERTONHA, A. Efeitos da instalação e da variabilidade entre sondas do uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Eutroférico. **Acta Scientiarum Maringá**, v. 23, n. 5, p. 1165-1171, 2001.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madson v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VAZ, C. M. P.; MATSURA, E. E.; TORRADO, P. V.; BACCHI, O. O. S. Validação de 3 Equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a Medida da Umidade de Solos. **Comunicado técnico Embrapa**. 2004.

WALKER, J. P. ; WILLGOOSE, G. R.; KALMA, J. D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. **Journal of Hydrology**. v. 293, p. 85–99. 2004.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BATATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**., v. 28, Supplement 1, p. 256-265, 2012.

YAN, W. ; ZHONG, Y; SHANGGUAN, Z. Responses of different physiological parameter thresholds to soil water availability in four plant species during prolonged drought. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 247, p. 311–319. 2017.

ZANETTI, S. S.; CECILIO, R. A.; SILVA, V.H.; ALVES, E. G. General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 530, p657-666, 2010.

