

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CAMPUS ITAQUI
CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**CALIBRAÇÃO DE SONDA DE CAPACITÂNCIA PARA
A MEDIDA DO CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Amanda Thirza Lima Santos

**Itaqui, RS, Brasil
2013**

AMANDA THIRZA LIMA SANTOS

**CALIBRAÇÃO DE SONDA DE CAPACITÂNCIA PARA A MEDIDA DO
CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Agrônoma**.

Orientador: Cleber Maus Alberto

Itaqui, RS, Brasil
2013

Santos, Amanda Thirza Lima.

Calibração de sonda de capacitância para a medida do conteúdo de água do solo /Amanda Thirza Lima Santos. 33p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Universidade Federal do Pampa – BACHARELADO EM AGRONOMIA, 2013.

“Orientação: Cleber Maus Alberto”.

1. Constante dielétrica. 2. Umidade. 3. Frequência no domínio do tempo . I. Título.

AMANDA THIRZA LIMA SANTOS

**CALIBRAÇÃO DE SONDA DE CAPACITÂNCIA PARA A MEDIDA DO
CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheira Agrônoma**.

Trabalho de conclusão de curso defendido e aprovado em: 09 de outubro de 2013.
Banca examinadora:

Prof. Dr. Cleber Maus Alberto
Orientador
Curso de Agronomia - UNIPAMPA

Prof. Dr. Amauri Nelson Beutler
Curso de Agronomia - UNIPAMPA

Prof. Dr. Paulo Jorge de Pinho
Curso de Agronomia - UNIPAMPA

Aos meus amados pais, Rosilda e Amadeus,
maiores incentivadores e fontes inesgotáveis
de apoio, amor, esperança e compreensão...
Porque família é tudo!

AGRADECIMENTO

A Deus por me conceder o dom da vida e a oportunidade de estudar.

A minha mãe Rosilda Furtado de Lima Santos por serem meu porto seguro e fonte inspiração e por me ajudar a compreender o valor da família.

Ao meu pai, Amadeus Guardino dos Santos, pelas suas palavras de conforto nos momentos certos.

A minha avó Genuina Furtado de Lima pelo amor e carinho inesgotável e pela fé depositada em mim.

Aos meus familiares por me apoiarem sempre.

Ao Prof. Dr. Cleber pela paciência e orientação para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Gibran Alves e aos meus amigos Bruna Alcântara, Elza Eliza Tenório Altvater, Francilene Tartaglia e Nelson Cristiano Epping pela ajuda e também pelo incentivo e apoio.

Aos professores, minha gratidão por transmitirem seus conhecimentos e idéias participando da minha formação como profissional.

A todos os colegas integrantes do Grupo de Estudo em Água e Solo (GEAS), Geter Alves Machado, Gentil Félix Da Silva Neto, Robson Giacomeli, Claudio Vinicius Leal Lima, Alex Cristiano Bartz, Lourenço Vargas e Jean Fresinghelli pelo convívio, auxílio na execução desse projeto e pelos momentos de amizade.

Aos amigos que me apoiaram e auxiliaram para que eu conseguisse concluir esse trabalho e por serem compreensivos.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

Sinceramente, muito obrigada!!!

RESUMO

CALIBRAÇÃO DE SONDA DE CAPACITÂNCIA PARA A MEDIDA DO CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO

Autor: Amanda Thirza Lima Santos

Orientador: Cleber Maus Alberto

Local e data: Itaqui, 09 de outubro de 2013.

Há diversos métodos que quantificam o conteúdo da água do solo. No intuito do uso sustentável da água foram desenvolvidos sensores que determinam o conteúdo de água no solo de forma indireta, como o Diviner 2000[®], uma sonda do tipo frequência no domínio do tempo (FDR). Este trabalho teve como objetivo calibrar essa sonda de capacitância para Plintossolos, solos comuns na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. O trabalho foi realizado no campo experimental da Universidade Federal do Pampa, Campus Itaqui, utilizando as normas sugeridas pelo fabricante para o processo de calibração do aparelho. Usou-se um experimento bifatorial no delineamento inteiramente casualizado com 3 níveis de saturação em duas repetições com 4 camadas de solo por tratamento, comparando a umidade obtida pela sonda com o método direto padrão de determinação do conteúdo de água do solo. Entretanto, não foi possível atingir o objetivo proposto, devido a grande variabilidade dos resultados obtidos através das leituras de frequência relativa. Conclui-se que para a calibração da sonda de capacitância Diviner 2000[®] em Plintossolos sejam realizados mais estudos verificando os fatores que podem ter influenciado a constante dielétrica do solo, que consequentemente afetou os resultados, impedindo a calibração deste aparelho para este solo.

Palavras-chave: constante dielétrica, umidade, frequência no domínio do tempo

ABSTRACT

CALIBRATION PROBE CAPACITANCE FOR MEASUREMENT OF SOIL WATER CONTENT

Author: Amanda Thirza Lima Santos

Advisor: Cleber Maus Alberto

Data: Itaqui, October 09, 2013.

There are several methods that measure the water content of the soil. The aim of sustainable water use were developed sensors that determine the water content in the soil indirectly , as the Diviner 2000[®], a probe-type frequency in the time domain (FDR) . This study aimed to calibrate this probe capacitance to Plintosols soils common in the Fronteira Oeste of Rio Grande do Sul. The study was conducted at the experimental field of the Federal University of Pampa, Itaqui Campus, using the guidelines suggested by the manufacturer for the processing of calibration of the device. Used a factorial experiment in a completely randomized design with 3 levels of saturation in two replications with 4 layers of soil per treatment, obtained by comparing the moisture probe with standard direct method for determining the water content of the soil. However, it was not possible to reach that goal , due to the great variability of the results obtained from the readings of relative frequency . It is concluded that the calibration of the probe capacitance Diviner 2000 [®] in Plintossolos be further studies investigating factors that may have influenced the dielectric constant of the soil , which consequently affected the results , preventing the calibration of this device for this soil.

Keywords: dielectric constant, moisture, time domain frequency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Frequência relativa (FR) ao longo do perfil do solo (0,1- 0,4 m) nos três níveis de umidade propostos (seco, úmido, saturado).	23
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição granulométrica e densidade do solo de um Plintossolo nas diferentes camadas estudadas	22
Tabela 2: Dados de umidade volumétrica e frequência relativa (FR) nos três níveis de saturação do solo nas camadas de 0,1 a 0,4 m de solo.	23
Tabela 3: Fonte de dados, equações e coeficiente de determinação (R^2), de diferentes calibrações desenvolvidas com sondas de capacitância sob condições de campo.....	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Solo.....	14
2.2 Umidade	14
2.3 Sensores de capacitância	15
2.3.1 Diviner.....	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Instalação dos tubos.....	18
3.2 Leitura das frequências.....	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5 CONCLUSÃO	27
6 REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

A umidade do solo influencia diretamente o volume de água nele armazenado, bem como sua resistência a penetração das raízes e a compactação, entre outros fatores. Logo, é essencial o conhecimento da umidade do solo para estudos do movimento e disponibilidade da água no solo, erosão, época e quantidade de água a ser aplicada em irrigação (BERNARDO et al., 2006). Para aplicar a quantidade correta de água na irrigação é necessário haver estratégias de manejo correto, afim de que se tenha o aumento da eficiência do uso da água. Há diversos métodos que quantificam o conteúdo da água do solo, sendo o método gravimétrico considerado o método direto padrão e os métodos indiretos, aqueles que estimam o conteúdo de água no solo a partir de outras propriedades do solo.

No intuito de fornecer a quantidade exata de água para atender as demandas hídrica das plantas, foram desenvolvidos sensores, que por meio das propriedades físicas e químicas do solo e da água conseguem determinar, de forma indireta, a umidade de água do solo.

O Diviner 2000[®] é um exemplo do método de medida indireto, do tipo frequência no domínio do tempo (FDR), conhecido também como sensor de umidade do solo por capacitância, utilizado para o monitoramento da água do solo e/ou manejo de irrigação.

Em virtude de esse sensor determinar o conteúdo de água do solo de forma indireta, é imprescindível a realização de calibrações para os solos a serem monitorados, em razão das diferenças físicas e químicas que os mesmos apresentam. Apesar do equipamento apresentar uma calibração universal, o fabricante, bem como os resultados na literatura (PALTINEANU & STARR, 1997; MORGAN et al., 1999; BAUMHARDT et al., 2000; FARES et al., 2004; GROVES & ROSE, 2004 e ANDRADE JUNIOR, 2007), ressaltam que calibrações locais podem melhorar a precisão do equipamento.

O uso de sensores é um meio preciso, quando calibrados, para o monitoramento do conteúdo de água no solo, e estão sendo utilizados em muitos trabalhos que necessitam do acompanhamento da umidade do solo com precisão, praticidade, rapidez e repetitividade nas medidas realizadas em um determinado ponto do perfil do solo (FARES & ALVA, 1999; GIRONA et al., 2002 e SILVA, 2008).

Porém, como qualquer tipo de equipamento destinado à medição indireta de propriedades do solo, sua aplicação carece de verificação da qualidade dos dados gerados e de comprovação do grau de fidelidade das medidas com a realidade que se pretende caracterizar (LIMA, 2012).

Assim, este trabalho tem como objetivo determinar a equação de calibração para a medida de água no solo em um Plintossolo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo

O solo é a camada superficial sólida e porosa constituída de partículas minerais e orgânicas distribuídas em horizontes de profundidade variável, com uma composição irregular de poros e canais formados pelos sólidos. Os poros são preenchidos de solução aquosa composta de vários eletrólitos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , e outros componentes) e de solução gasosa composta principalmente de N_2 , O_2 , vapor d'água, CO_2 e pequenas quantidades de outros gases (EMBRAPA, 2006; LIBARDI, 2000).

O solo pode reter água, armazenando-a por um determinado tempo. A capacidade de retenção da água varia de acordo com a composição do solo, estrutura e conteúdo de matéria orgânica. Em solos arenosos com pouca matéria orgânica ocorre infiltração mais rápida e pouca retenção da água devido o predomínio de macroporos, que permitem a drenagem livre da água do solo. Já em solos argilosos, há maior retenção de água no solo devido à presença dos microporos que retém a água contra as forças da gravidade (LOPES, 1989; LEPSCH, 2002).

De acordo com o conteúdo e a natureza da retenção de umidade, reconhecem-se três estados de solo: saturado, úmido e seco. O solo saturado contém todos os poros preenchidos com água e o ar está praticamente ausente. No solo úmido, há presença de ar nos macroporos e água nos microporos. E no solo seco pode ainda existir certa quantidade de água sob a forma de películas extremamente finas ao redor de partículas coloidais, no entanto, essa água é retida com força superior a capacidade de extração das plantas.

2.2 Umidade do solo

A umidade do solo é definida por Libardi (2000), como o índice mais básico, quantificador de água em uma determinada amostra de solo, que pode ser expressa a base de volume (θ) ou a base de peso (u).

Para a determinação da umidade do solo existem métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos, o gravimétrico é o mais utilizado. Entretanto os métodos indiretos são considerados mais adequados para indicar a umidade do solo, pois oferecem facilidade na operação, disponibilização de resultados rápidos e precisos e como também a facilidade de acoplamento em sistemas automáticos de coleta de dados. De acordo com Teixeira (2004) os principais métodos indiretos baseiam-se em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência do solo a passagem de corrente elétrica, a constante dielétrica do solo e a tensão da água no solo. Este método geralmente empregam sensores que requerem algum tipo de calibração.

2.3 Sensores de capacitância

A partir de 1980, como alternativa para determinação da umidade do solo pelo método direto, surgiram vários métodos baseados em respostas às propriedades eletromagnéticas do solo (EM) (TOPP et al., 1980; DEAN et al., 1987; PALTINEANU; STARR, 1997). Esses métodos indiretos têm sido difundidos por apresentar vantagens, como resultados rápidos, precisão aceitável, não emissão de radiação ionizante, capacidade de medições simultâneas e não destrutivas e o armazenamento contínuo dos dados por períodos extensos, proporcionando o monitoramento (STACHEDER et al., 2009).

O princípio dos métodos EM é a emissão de sinal elétrico e a medição da resposta a este sinal (geralmente o tempo de reflexão ou a frequência), que ocorre devido a mudanças na permissividade aparente ou na constante dielétrica do solo (EVETT et al., 2006).

Segundo Topp (1980) e Yoder et al. (1998) a constante dielétrica das partículas minerais e orgânicas do solo varia entre 2 e 7, a do ar é igual a 1, enquanto que a constante dielétrica da água é de aproximadamente 81, devido a variação desta constante no meio solo-água-ar é possível a estimativa do conteúdo de água presente no solo.

A água é o componente com maior influência sobre a constante dielétrica e apresenta permissividade relativa muito maior do que a de partículas minerais e orgânicas do solo, e do ar, o que possibilita a estimativa da umidade pela medição da constante dielétrica (TOPP et al., 1980).

A medição do conteúdo de água em camadas de solo mais profundas, por meio de sensores de “time domain reflectometry” (TDR) ou por gravimetria, requer o uso de trincheiras e de numerosas amostragens ou a instalação de hastes metálicas, o que dificulta e onera o monitoramento em áreas maiores (VELDKAMP & O'BRIEN, 2000; NIJLAND et al., 2010).

Entretanto, as sondas com multisensores de capacitância (MCP) ou “frequence domain reflectometry” (FDR), que permitem a medição em várias profundidades e locais em tempo real, têm sido mais utilizadas no manejo da irrigação em diferentes culturas, na comparação de métodos de preparo do solo, na avaliação do movimento de nutrientes, no balanço hídrico em áreas cultivadas e no monitoramento da umidade do perfil do solo em ecossistemas naturais e áreas de cultivo (STARR & PALTINEANU, 1998; GUERRA et al., 2005; FARES et al., 2006; PREVEDELLO et al., 2007; OELMANN et al., 2007; NIJLAND et al., 2010). Este tipo de sensor utiliza o solo como parte de um condensador, de tal forma que medindo sua capacitância obtêm-se a constante dielétrica do solo, conseqüentemente, seu conteúdo de água, permitindo ainda um registro de dados num *datalogger* (PALTINEANU; STARR, 1997; STARR; PALTINEANU, 1998; FARES; ALVA, 2000). Porém, a sonda apresenta a desvantagem de utilizar de um escasso volume de solo para as determinações da capacitância, impondo a necessidade de uma perfeita instalação do tubo de acesso das sondas utilizadas para leitura (EVETT; STEINER, 1995; TOMER; ANDERSON, 1995; OULD MOHAMED ET al., 1997; HIDALGO et al., 2003).

Os sensores FDR e TDR apresentam equações de calibração padrão de fábrica que relacionam o conteúdo de água à leitura de saída do sensor. Entretanto, para medições mais acuradas, é necessário realizar calibrações para os diferentes solos, em virtude das propriedades eletromagnéticas inerentes à cada classe de solo (FARES et al., 2006; PREVEDELLO et al., 2007).

2.3.1 Diviner 2000®

O Diviner 2000® é uma sonda portátil para medição do conteúdo de umidade do solo, desenvolvida pela empresa australiana Sentek Pty Ltda. Este aparelho é um exemplo do método de medida indireto do tipo frequência no domínio do tempo

(FDR) e tem atraído atenção, principalmente, pelo fato de ser uma sonda perfiladeira, onde as leituras no perfil do solo são obtidas de forma mais prática.

Esta sonda é constituída de um par de eletrodos que funciona como um capacitor eletrônico, que quando ativado, a matriz solo-água-ar forma o meio dielétrico (isolante) do capacitor. A área dos eletrodos e a distância entre eles são fixas na sonda, levando ao aumento da capacitância consideravelmente com um aumento no número de moléculas de água livres, e com seus dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor, ou seja, quanto maior a umidade do solo maior será também a capacitância e, conseqüentemente, menor a frequência do circuito (PALTINEANU; STARR, 1997; SENTEK, 2000).

A sonda portátil apresenta um visor (datalogger) com teclado e coletor de dados acoplados, via cabo, a uma haste que na sua extremidade tem o sensor, que ao ser inserido no tubo de acesso no solo, por um operador, disponibiliza automaticamente leituras do conteúdo de umidade a cada 10 cm de profundidade, à medida que a sonda é inserida no tubo.

A vantagem do Diviner 2000[®] é a sua portabilidade, permitindo o monitoramento de diversos perfis de umidade do solo (até 99 perfis) com apenas uma sonda. Além disso, apresenta peso leve e leituras rápidas e precisas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido na área experimental da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), no município de Itaqui (Latitude: 29°09'21.68" S; Longitude: 56°33'02.58" W; altitude: 74 m). O município está localizado na Fronteira-Oeste do Estado do Rio Grande do Sul e apresenta clima Cfa, segundo a classificação climática de Köppen, que significa subtropical com verões quentes e sem estação seca definida (MORENO, 1961).

O solo do local é classificado como Plintossolo Háplico, caracterizado pela má drenagem, sendo estes solos macios quando úmidos, mas extremamente duro quando seco (EMBRAPA, 2013).

Usou-se um experimento bifatorial no delineamento inteiramente casualizado com 3 níveis de saturação em duas repetições com 4 camadas de solo por tratamento, comparando a umidade obtida pela sonda com o método direto padrão de determinação do conteúdo de água do solo.

3.1 Instalação dos tubos

Seis tubos de acesso feitos de PVC (diâmetro externo = 51,5 mm, diâmetro interno = 51 mm e comprimento de 1,5 m) foram instalados em duas linhas, usando uma disposição de 5 por 2 m.

Para a instalação dos tubos, foi fixada uma base metálica na parte inferior do tripé e posteriormente, a instalação do tripé onde seriam fixados e nivelados os tubos através de um nível de bolha. Um trado especial, semelhante ao trado holandês, foi utilizado para a introdução dos tubos de acesso, visando um melhor contato entre o tubo e o solo. Após a retirada do solo com a ajuda do trado foi colocado o tubo de acesso com a ajuda de uma marreta

No final da instalação do tubo de acesso foi realizada a limpeza na parte interna do tubo para retirada do excesso de solo, e logo após foi colocada uma válvula de vedação na extremidade inferior e na parte superior do tubo conectada uma tampa, visando evitar a entrada de água e pequenos animais. A instalação foi realizada de modo a garantir um bom contato entre o solo e o tubo de acesso.

Após 15 dias, foi aberta uma trincheira distante 0,4 m dos tubos para a coleta de amostras indeformadas de solo para a determinação da densidade nas camadas de 0 a 0,1 m, 0,1 a 0,2 m, 0,2 a 0,3 m e 0,3 a 0,4m. A densidade do solo foi avaliada por meio dos anéis, previamente identificados e pesados. Posteriormente, 12 amostras, sendo três repetições por camada, foram pesadas obtendo-se a massa úmida e, levadas a estufa 105°C por 48 hs, após este período foram novamente pesadas determinando-se a massa seca. Com os dados de altura e diâmetro de cada anel, massas úmida e seca, obteve-se a densidade de cada amostra de acordo com a seguinte fórmula:

$$D = \frac{M_{ss}}{V_a}$$

Onde:

D = densidade do solo (g.cm⁻³)

M_{ss} = massa do solo seco (g)

V_a = volume do anel

Três níveis de umidade foram utilizados para cobrir toda a amplitude nos valores do conteúdo de água no solo, denominados de saturado, úmido e seco.

3.2 Leitura das frequências

Utilizou-se a sonda de capacitância, modelo Diviner 2000®, da Sentek Pty Ltda, Austrália. Por recomendação do fabricante, primeiramente foram registradas as leituras (frequências) dentro de um tubo de PVC exposto separadamente do ar e água. Os valores da leitura da frequência no tubo de PVC totalmente suspenso no ar (F_a) e da leitura da frequência no tubo de PVC imerso em água (F_w) foram instalados e normalizados no Diviner 2000® e mantidos para todas as medidas.

As leituras realizadas no solo (frequências) foram normalizadas e chamadas de frequência relativa (FR), pela equação definida como:

$$FR = \frac{(F_a - F_s)}{(F_a - F_w)}$$

Onde:

Fa = a leitura da frequência no tubo de PVC totalmente suspenso no ar

Fs = a leitura da frequência no tubo de PVC no solo

Fw = a leitura da frequência no tubo de PVC imerso em água.

A normalização das leituras é necessária, devido não existir exatidão nas leituras realizadas por sondas diferentes, dada uma condição particular, como, por exemplo, água e ar (SENTEK, 2000).

Para cada nível de umidade foram utilizados dois tubos. Para o nível de saturação, as leituras e a coleta de amostras do solo deformadas foram realizadas após 48 horas de ter ocorrido precipitação local, que permitiu a saturação do solo, onde a frente de molhamento atingiu mais que 0,5 m de profundidade. Para o nível úmido as leituras foram realizadas 7 dias após o período de precipitação. E para o nível seco, foi necessário esperar um período seco, aproximadamente 15 dias após a precipitação que havia permitido a saturação do solo para as primeiras leituras, para a realização das leituras e coleta do solo.

Foram realizadas três leituras de FR para cada camada de solo 0,1m, 0,2 m, 0,3 m e 0,4 m, sendo que cada camada consisti de 0,1 m, e com os dados armazenados foi gerada uma média de FR para cada camada de solo. Imediatamente após a realização das leituras se procedeu a coleta do solo para a determinação da umidade gravimétrica e textura de cada camada do solo. Para isto, a cada 0,1 m de profundidade, três amostras de solo deformadas foram retiradas de maneira adjacente ao tubo e colocada em uma lata de alumínio com tampa, que havia sido previamente pesada e identificada. As amostras foram pesadas e colocadas para secagem em estufa (105°C por 48 horas), para posterior pesagem. As porcentagens de areia, silte e argila foram determinadas pelo método da Pipeta (EMBRAPA, 1997).

A umidade volumétrica foi determinada por:

$$\theta = U_g \times D_s$$

Onde:

θ = umidade volumétrica

U_g = umidade gravimétrica

Ds = densidade do solo

Os valores da umidade volumétrica e das leituras de FR correspondentes foram submetidas a análise de variância e quando verificado efeito significativo dos tratamentos, os mesmos foram submetidos a análise de regressão para calibração das curvas, por meio do programa estatístico R.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores encontrados por meio da análise granulométrica do solo refletem em uma variação nas porcentagens de areia, silte e argila nas diferentes camadas de solo. Alguns autores constataram que mesmo em um solo com granulometria próxima, os coeficientes e , conseqüentemente, as curvas podem variar, subestimando ou superestimando o conteúdo de água no solo, havendo variação nas curvas das camadas de um mesmo perfil de solo (SILVA et. al., 2008).

Tabela 1 - Composição granulométrica do perfil de solo utilizado no estudo (Plintossolo) nas diferentes camadas estudadas.

Camada (m)	Areia (g.kg ⁻¹)	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila (g.kg ⁻¹)
0,0 - 0,1	549,23	300,37	150,40
0,1 - 0,2	565,83	309,97	124,20
0,2 - 0,3	574,33	275,27	150,40
0,3 - 0,4	565,68	249,46	184,85

Para a calibração da sonda, os valores de F_w e F_s foram respectivamente 126620 e 175667 MHz, se aproximando dos valores obtidos pelo fabricante, 120000 e 160000 MHz. Os níveis de umidade se agruparam em três grupos de valores diferentes, com médias de FR de 0,6748 (saturado), 0,5727 (úmido), 0,6198 (seco), onde o maior valor de FR encontrado foi 0,9222 (saturado a 0,3 m de profundidade) e o menor de 0,4616 (seco a 0,3 m de profundidade) (Tabela 2).

Tabela 2 – Dados de umidade volumétrica e frequência relativa (FR) nos três níveis de saturação do solo nas camadas de 0,1 a 0,4 m de um plintosolo.

NÍVEL DE SAURAÇÃO	CAMADA	TUBO	UMIDADE VOLUMÉTRICA (%)	FR
SATURADO	1	A	48,0996	0,6680
SATURADO	1	B	54,4603	0,6019
SATURADO	2	A	56,0715	0,7142
SATURADO	2	B	52,1943	0,5001
SATURADO	3	A	46,6866	0,9222

SATURADO	3	B	47,5308	0,4634
SATURADO	4	A	52,5695	0,9466
SATURADO	4	B	47,5937	0,5815
UMIDO	1	A	38,4579	0,5763
UMIDO	1	B	28,6770	0,6485
UMIDO	2	A	33,1477	0,4964
UMIDO	2	B	32,6816	0,6231
UMIDO	3	A	31,7688	0,4651
UMIDO	3	B	32,8479	0,4628
UMIDO	4	A	31,7539	0,5815
UMIDO	4	B	32,4418	0,7275
SECO	1	A	26,8030	0,6076
SECO	1	B	34,6134	0,7356
SECO	2	A	34,4313	0,4586
SECO	2	B	34,4405	0,6867
SECO	3	A	31,3884	0,4621
SECO	3	B	30,1721	0,6994
SECO	4	A	34,2910	0,6114
SECO	4	B	39,9681	0,6964

De acordo com a metodologia descrita pelo fabricante, foram realizadas duas repetições (2 tubos de acessos) para obtenção dos coeficientes de calibração. No entanto, obtiveram-se valores diferentes para a mesma situação, onde as FR foram diferentes para um mesmo nível de saturação em tubos de acesso diferentes. Silva et al. (2012) também obtiveram resultados semelhantes em um trabalho que determinou a acurácia de uma sonda de multisensores de capacitância para avaliação do conteúdo de água no solo.

Pode-se observar na tabela 2 e figura 1, que as frequências relativas apresentaram grande variabilidade entre as camadas de solo e níveis de saturação, onde frequências da amostragem considerada de nível de solo seco apresentaram maiores valores que em solos saturados.

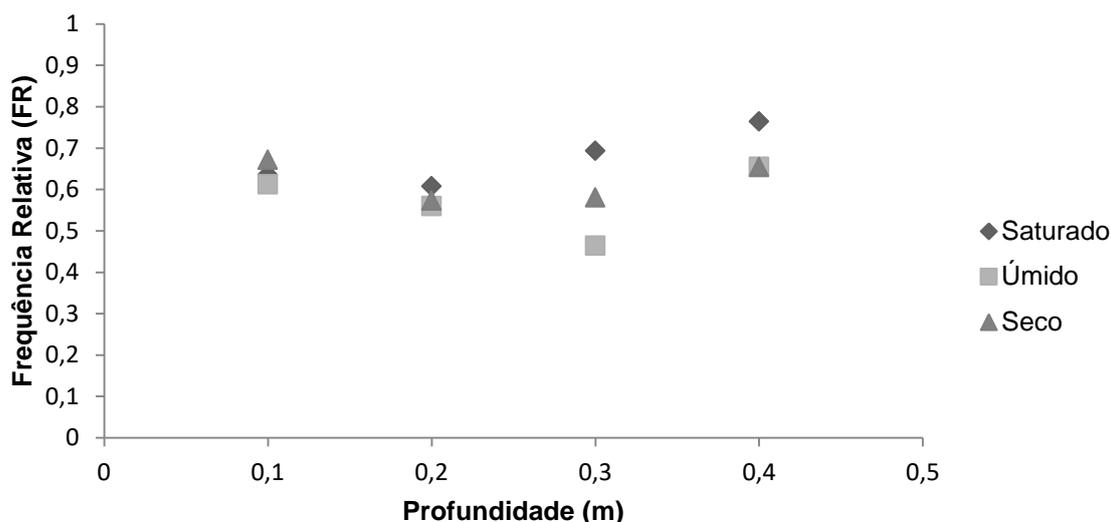


Figura 1 - Frequência relativa (FR) ao longo do perfil do solo (0,1- 0,4 m) nos três níveis de umidade propostos (seco, úmido, saturado).

Esse resultado pode ser atribuído a presença de maiores concentrações em certos pontos do solo de óxidos de ferro provenientes da composição da plintita, visualizadas sob a forma de mosqueados ferruginosos durante a retirada de amostras de solo para determinação da umidade volumétrica, próximo aos tubos de acesso. Segundo Souza et al. (2001) e Andrade et al. (2003), as leituras da constante dielétrica são influenciadas pela presença dos óxidos de ferro, podendo ter influenciado os resultados, pois ao afetar a constante dielétrica, conseqüentemente, se afetou a umidade do solo estimada em virtude da presença elevada de cargas positivas no complexo de troca (VILLWOCK et al., 2004; SANTOS et al., 2010).

Com o objetivo de comparar a calibração da sonda capacitiva Diviner 2000® fornecida pelo fabricante e as encontradas em outros trabalhos (MORGAN et al., 1999; FARES et al., 2004), foram utilizadas as equações sugeridas por outros autores. As curvas foram desenvolvidas e construídas com as leituras de FR obtidas por este experimento, para as profundidades de 0 a 0,4 m (Tabela 3).

Tabela 3 - Fonte de dados, equações e coeficiente de determinação (R^2), de diferentes calibrações desenvolvidas com sondas de capacitância em campo no perfil de 0 a 0,4m.

Fonte de dados	Equação	R ²
Calibração do fabricante	$\theta = 0,494 \text{ FR}^{3,017}$	0,1041
Morgan et al (1999)	$\theta = 0,451 \text{ FR}^{2,12}$	0,0987
Fares et al (2004)	$\theta = 0,440 \text{ FR}^{1,549} - 0,040$	0,0987
Andrade Junior et al (2007)	$\theta = 0,397 \text{ FR}^{2,533}$	0,0682

Os baixos valores do coeficiente de determinação (R²) indicam que a variabilidade dos resultados da sonda de capacitância Diviner 2000[®] não permite explicar adequadamente os dados médios obtidos pelo método gravimétrico. Entretanto, a existência de uma correlação, mesmo fraca, entre os dados obtidos com a sonda e os determinados pelo método gravimétrico.

A partir das leituras realizadas para cada camada, foi realizada uma análise estatística utilizando a média da leitura da capacitância da sonda nos seis tubos de acessos utilizados nos diferentes níveis de saturação do solo. Entretanto, os dados não foram significativos, impedindo a elaboração de uma equação para a calibração da sonda de capacitância.

Outras hipóteses para a dificuldade na calibração da equação podem ser consideradas, como a ocorrência de problemas de contato entre os tubos de acesso e o solo, e a presença de água condensada no interior do tubos no momento das leituras, problemas também levantados por Silva et. al.(2008).

Em todas as camadas e em todas as avaliações foram encontrados baixos coeficientes de determinação, indicando pouca confiabilidade e acurácia deste aparelho para as condições avaliadas.

Alguns autores em estudos, também constataram limitações na utilização dessa sonda que podem inviabilizar o uso deste equipamento. Evett et al. (2007) e Lima et al (2012) também constataram dados subestimados em relação a calibração de uma sonda de capacitância, impossibilitando, sem mais estudos, a substituição da determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico por leituras provenientes do aparelho em estudo.

No relatório da FAO/IAEA (2003) é apresentado um estudo comparativo de alguns sensores de medição de umidade do solo, em que a sonda de capacitância Diviner 2000[®], semelhante a utilizada nesse trabalho, apresentou baixos resultados em relação a acurácia e precisão.

Não foi possível calibrar uma equação para a sonda de capacitância utilizada no estudo com as leituras de umidade e frequência obtida, pois os dados obtidos indicam que a metodologia aplicada não foi adequada para a obtenção dos valores de FR para a faixa de umidade de 26% a 56%.

5 CONCLUSÃO

Não foi possível a calibração da sonda de capacitância em um Plintossolo através da metodologia usada nesse trabalho, havendo a necessidade de mais estudos.

6 REFERÊNCIAS

ANDRADE, C.L.T.; COSTA, E.L. & ALBUQUERQUE, P.E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda de TDR. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, 7. 173-176, 2003.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; SILVA, C. R.; DANIEL. R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.4, p.303-307, 2007.

DEAN, T.J.; BELL, J.P.; BATY, A.J.B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. 1. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.93, 1987.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPACNPS, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Princípios agrônômicos da irrigação**. Antenor de Oliveira Aguiar Netto, Edson Alves Bastos, editores técnicos. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

EVETT, R. S.; STEINER, J. L. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 961-968. 1995.

EVETT, S.R.; TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. **Vadose Zone Journal**, v.5, p.894-907, 2006.

EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. Comparison of soil water sensing methods for irrigation management and research. In: **Central Plains Irrig. Conf.**, Kearney, NE. 2007. p. 1-19.

FAO/IAEA. Food and Agriculture Organization / International Atomic Energy Agency. Comparason of soil moisture sensors between nêutron probe, time domain reflectometry and capacitance probe. Report IAEA-3111-CT00028, Viena (2003), 14 p.

FARES, A.; ALVA, A. K. Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, v. 64, p. 311-318, 2000.

FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A.I.; PARSONS, L.R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. ***Vadose Zone Journal***, Madison, v.4, p.1390-1399, 2004.

FARES, A.; HAMDHANI, H.; POLYAKOV, V.; DOGAN, A.; VALENZUELA, H. Real-time soil water monitoring for optimum water management. ***Journal of the American Water Resources Association***, v.42, p.1527-1535, 2006.

GIRONA, J. Mata, M.; FERERES, E.; GOLDHAMER, D.A.; COHEN, M. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water stress. ***Agricultural Water Management***, Amsterdam, v.54, p.107-122, 2002.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.; SAMPAIO, J.B.R.; SILVA, H.C.; ARAÚJO, M.C. de. ***Irrigação do cafeeiro no cerrado***: estratégia de manejo de água para uniformização de florada. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. 4p.

LEPSCH, Igo F. Formação e Conservação Dos Solos. ***Oficina de Textos***. São Paulo. 2002.

LIBARDI, P. L. ***Dinâmica da Água no Solo***. 2. ed., Piracicaba – SP: O autor, 2000.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. ; KOIDE, S.; SANTOS, R. M. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de

Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 17 n.1 - Jan/Mar 2012, 23-32.

LOPES, Alfredo Scheid (trad. e adapt.). **Manual de fertilidade do solo**: São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989.

MIRANDA, Fábio et al. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. *Rev. Ciênc. Agron., Fortaleza*, v.38, n.3, p.317-321, Jul.-Set., 2007.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 46p.

NIJLAND, W.; MEIJDE, M. van der; ADDINK, E.A.; JONG, S.M. de. Detection of soil moisture and vegetation water abstraction in a Mediterranean natural area using electrical resistivity tomography. **Catena**, v.81, p.209-216, 2010.

OELMANN, Y.; KREUTZIGER, Y.; TEMPERTON, V.M.; BUCHMANN, N.; ROSCHER, C.; SCHUMACHER, J.; SCHULZE, E.D.; WEISSER, W.W.; WILCKE, W. Nitrogen and phosphorus budgets in experimental grasslands of variable diversity. **Journal of Environmental Quality**, v.36, p.396-407, 2007.

PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.1576-1585, 1997.

PREVEDELLO, C.L.; MAGGIOTTO, S.R.; LOYOLA, J.M.T.; DIAS, N.L.; BEPPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1-8, 2007.

SANTOS, M.R. dos; 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 de Ciência do Solo**, v.34, p.299-307, 2010.

SENTEK. **Diviner 2000: user guide version 1.4**. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2007.

SILVA, C. R. da; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, A. B.; MELO, F. B.; COELHO FILHO, M. A. Calibração da sonda sonda de capacitância Diviner 2000® em um argissolo. **Sci. agric.** vol.64 no.6, Piracicaba, Nov./Dec. 2007.

SILVA, Cláudio Ricardo da et al . Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Sci. agric.**, Piracicaba, v. 64, n. 6, dez. 2007.

SILVA, C. R. da; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; SOUZA, C. F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. In: **II Workshop de Aplicações de Técnicas Eletromagnéticas para o Monitoramento Ambiental**. Anais...Taubaté-SP, 2008.

SILVA, B. M., OLIVEIRA, G. C., SERAFIM, M. E., SILVA JÚNIOR, J. J., COLOMBO, A., LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa agropecuária brasileira** [online]. 2012, Brasília, vol.47, n.2, pp. 277-286.

STACHEDER, M.; KOENIGER, F.; SCHUHMANN, R. New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements. **Sensors**, Basek, v.9, p.2951-2967, 2009.

STARR, J.L.; PALTINEANU, I.C. Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. **Soil and Tillage Research**, Montpellier, v.47, p.43-49, 1998.

TEIXEIRA A. S. COELHO, S.L. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24:p.536–545, set.-dez. 2004.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, p.574-582, 1980.

VELDKAMP, E.; O'BRIEN, J.J. Calibration of a frequency domain reflectometry sensor for humid tropical soils of volcanic origin. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.1549-1553, 2000.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, Botucatu, v.9, p.82-88, 2004.

YODER, R.E.; JOHNSON, D.L.; WILKERSON, J.B.; YODER, D.C. Soil water sensor performance. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.14, n.2, p.121-133, 1998.