



SAMUEL COLA PIZETTA

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE CAPACITÂNCIA
(FDR) PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE EM
DIFERENTES SOLOS**

LAVRAS – MG

2015

SAMUEL COLA PIZETTA

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE CAPACITÂNCIA (FDR) PARA
ESTIMATIVA DA UMIDADE EM DIFERENTES SOLOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de Concentração em Engenharia e Manejo de Sistemas de Irrigação, para obtenção do título de mestre.

Dr. Geraldo Magela Pereira
Orientador

**LAVRAS – MG
2015**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo próprio autor.

Pizetta, Samuel Cola.

Calibração de sensores de capacitância (FDR) para a estimativa da umidade em diferentes solos / Samuel Cola Pizetta. – Lavras: UFLA, 2015.

67 p.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2015.

Orientador: Geraldo Magela Pereira.

Bibliografia.

1. Instrumentação. 2. Constante dielétrica. 3. Teor de água. 4. Manejo de irrigação. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

SAMUEL COLA PIZETTA

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE CAPACITÂNCIA (FDR) PARA
ESTIMATIVA DA UMIDADE EM DIFERENTES SOLOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, área de Concentração em Engenharia e Manejo de Sistemas de Irrigação, para obtenção do título de mestre.

APROVADA em 04 de dezembro de 2015.

Dr. Marcelo Ribeiro Viola	UFLA
Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFLA
Dra. Joelma Rezende Durão Pereira	UNILAVRAS

Dr. Geraldo Magela Pereira
Orientador

**LAVRAS – MG
2015**

Dedico
Aos meus pais e irmão

“Se não existe possibilidade de fracasso, então a vitória é insignificante.”

Robert H. Schuller

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

Aos meus pais, Carmindo Pizetta e Cristina Cola, por seu amor, apoio por suas palavras de ânimo e por ter contribuído pela formação do meu caráter.

Ao meu irmão Daniel, pelo apoio e estímulo para que eu alcançasse meus objetivos.

Às minhas tias Hozana e Eliza pelas orações e conselhos.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

À banca por ter aceitado o convite de avaliar essa dissertação.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pelos conhecimentos adquiridos durante a graduação.

Ao meu orientador, Prof. Geraldo Magela Pereira, pela orientação, por todos os ensinamentos e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho e das demais atividades do mestrado.

Aos coorientadores prof. Luiz Antônio Lima DEX-UFLA e prof. Marcelo Ribeiro Viola e ao professor Luiz Fernando Coutinho de Oliveira pela ajuda e disponibilidade no decorrer do experimento.

Ao prof. Renato Ribeiro de Lima pelo auxílio na estatística.

A todos os professores da UFLA que contribuíram para a minha formação.

Aos meus amigos, Tafarel, Leonardo, Carol, Rodrigo, Rogério, Nicolly, Jorge, Josimar, Beth, Joyce, Priscila, Rháldine e Fabiana, pela amizade, companhia e pelas palavras de ânimo.

À Michelle, pela companhia, carinho e compreensão.

Aos amigos, Fabian e André pela ajuda prestada durante a realização do experimento.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo e ao CNPq pela bolsa de Produtividade, que permitiram o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos meus amigos, familiares e a todos que contribuíram de alguma forma para que esta etapa fosse concluída.

RESUMO

Um dos maiores desafios de domínio agrícola é a mensuração prática, rápida e precisa do teor de água no solo, tornando indispensável o conhecimento acerca dos equipamentos que quantifiquem a umidade do solo. Nesse contexto, objetivou-se com este estudo, efetuar a calibração dos sensores de capacitância (FDR) 10HS (Decagon Devices) e dois sensores de “baixo custo”, designados como Grove e Eletrodex em relação ao método padrão de estufa, em três classes distintas de solo, o Argissolo, o Latossolo e o Nitossolo. Foi ainda realizada a comparação da curva de calibração recomendada pelo fabricante do sensor 10HS com aquela obtida em laboratório. O experimento foi realizado no laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras, Estado de Minas Gerais. Diante dos resultados, pode-se concluir que a equação de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS não é adequada para a quantificação da umidade dos solos testados. No entanto, quando devidamente calibrado, esse sensor pode ser utilizado de forma satisfatória para essa finalidade. Os sensores de baixo custo Grove e Eletrodex não permitiram estimar, de forma satisfatória, a umidade volumétrica do solo, nos intervalos de umidade testados, em nenhum dos solos submetidos à calibração, uma vez que não foi possível obter equações que apresentassem coeficientes de determinação adequados.

Palavras-chave: Instrumentação. Constante dielétrica. Teor de água. Manejo de irrigação.

ABSTRACT

Measurement of soil water content is one of the main challenges of agriculture and knowledge of available equipment to perform it is extremely important. This research aimed to calibrate capacitance sensors (FDR) such as 10HS manufactured by Decagon Devices and two low cost sensors referred to as Grove and Eletrodex. The calibration was carried out through comparisons to soil water content determined by dry oven at 105°C for three soil classes designated as dystrophic Red Argisol, dystroferric Red Latosol and eutroferric Red Nitosol. For 10HS sensor, the obtained values were compared to calibration curve supplied by the manufacturer. The experiment was set at the Hydraulics Laboratory at Federal University of Lavras, Minas Gerais State in Brazil. It can be concluded that the calibration curve supplied by Decagon Devices did not describe well the results obtained, although this sensor can be satisfactorily used to measure soil water content. According to determination coefficients calculated, low cost sensors did not estimate properly the soil water content at the moisture range evaluated at any soil class.

Key-words: Instrumentation. Dielectric constant. Content of water. Irrigation management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de um sensor de capacitância	23
Figura 2	Sensor de capacitância 10HS (A) e o leitor digital Procheck (B) ..	33
Figura 3	Microcontrolador Plataforma Arduino Uno do fabricante Atmel (A); Sensores capacitivos de “baixo custo” Grove (B) e Eletrodex (C).....	33
Figura 4	Curva de calibração com sua respectiva equação linear de 2° grau, obtida em laboratório e curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, para o Argissolo Vermelho distrófico.....	42
Figura 5	Curva de calibração com sua respectiva equação linear de 2° grau, obtida em laboratório e curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, para o Latossolo Vermelho distroférico.....	43
Figura 6	Curva de calibração com sua respectiva equação linear de 2° grau, obtida em laboratório e curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, para o Nitossolo Vermelho eutroférico.....	43
Figura 7	Comparação da curva de calibração realizada em laboratório para os três tipos de solos em conjunto (Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico), com a curva de calibração fornecida pelo fabricante, referente ao sensor 10HS	44
Figura 8	Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Argissolo Vermelho distrófico.....	49
Figura 9	Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Latossolo Vermelho distroférico.....	49

Figura 10	Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Nitossolo Vermelho eutroférico.....	50
Figura 11	Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Grove para o Argissolo Vermelho distrófico.....	52
Figura 12	Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Grove para o Latossolo Vermelho distroférico.....	52
Figura 13	Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Grove para o Nitossolo Vermelho eutroférico	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Atributos físico-hídricos referentes ao Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico	39
Tabela 2	Resultado da análise química do Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e do Nitossolo Vermelho eutroférico	41
Tabela 3	Teste de significância do modelo linear (de segundo grau) do sensor 10HS para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico e dos três solos simultaneamente	47
Tabela 4	Teste de significância do modelo linear (de primeiro grau) referente ao sensor Elettrodex para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico.....	51
Tabela 5	Teste de significância do modelo linear (de primeiro grau) referente ao sensor Grove para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 A água na produção agrícola.....	16
2.2 Irrigação no Brasil.....	17
2.3 Quantificação da umidade do solo	18
2.3.1 Método gravimétrico (padrão)	19
2.3.2 Sensores para quantificação da umidade do solo	20
2.3.2.1 Sensor de capacitância (FDR)	21
2.3.2.2 Sensores de resistência elétrica.....	25
2.3.2.3 Potencial matricial da água do solo	26
2.3.2.4 Sondas de nêutrons.....	26
2.3.2.5 TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo).....	27
2.3.3 Calibração de sensores	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5 CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Kinzli, Manana e Oad (2012) a agricultura é o setor que mais demanda água doce no mundo, cerca de 80%, e devido ao aumento crescente da demanda por esse recurso para produção de alimentos e biocombustíveis (GENSLER et al., 2009; ROSEGRANT et al., 2009), a agricultura irrigada precisa de aprimorar os métodos de gestão da água (COOLEY et al., 2009), ainda mais frente ao cenário de mudanças climáticas.

O conhecimento e monitoramento do conteúdo de água no solo são de fundamental importância para o manejo da irrigação, uma vez que o crescimento e o desenvolvimento adequado das plantas dependem do teor de água no solo (KITIĆ; CRNOJEVIĆ-BENGIN, 2013), sendo tal informação fundamental para o manejo racional da água.

A medição do teor de água no solo por meio de sensores de capacitância está em crescente utilização, devido aos seguintes fatores: não são métodos destrutivos, fornecem medições quase instantâneas (fração de segundos), requerem pouca ou nenhuma manutenção, podem permanecer no solo durante um longo período, são capazes de fornecer leituras contínuas e não é empregada radiação, o que permite medições precisas próximo à superfície do solo.

As desvantagens na utilização das sondas dielétricas consistem na necessidade de calibração para garantir medições precisas do teor de água no solo; sensibilidade ao tipo de solo e outros fatores, como a salinidade e a temperatura (INOUE et al., 2008; KIZITO et al., 2008).

Tendo em vista a importância da mensuração da umidade do solo para o manejo da agricultura irrigada, é importante o conhecimento acerca dos equipamentos que estimem de forma satisfatória essa umidade. Nesse contexto, torna-se importante avaliar o desempenho dos sensores e efetuar sua calibração,

em especial para os sensores de menor custo, para que os mesmos possam se tornar uma opção viável para os irrigantes.

Frente a tal contextualização, objetivou-se com este estudo realizar a calibração de três sensores de capacitância (10HS desenvolvido pela Decagon Devices e dois sensores de baixo custo o Eteodex e o Grove) por meio do método padrão de estufa em três classes distintas de solo, sendo Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico. Também foi feita a comparação da curva de calibração recomendada pelo fabricante do sensor 10HS com a calibração realizada em laboratório.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A água na produção agrícola

De acordo Taiz e Zeiger (2013) a água é o principal constituinte do tecido vegetal, representando aproximadamente 50% da massa fresca nas plantas lenhosas e cerca de 80 a 95% nas plantas herbáceas, sendo necessária como reagente no metabolismo vegetal, transporte e translocação de solutos, na turgescência celular, na abertura e fechamento dos estômatos e expansão do sistema radicular. Os autores complementam afirmando que uma pequena redução na disponibilidade de água pode afetar o crescimento, o desenvolvimento e, conseqüentemente, a produtividade das culturas.

Teoricamente, a água disponível às plantas se encontra entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. É dito teoricamente pelo fato de que muitas plantas, antes mesmo de atingir a umidade no ponto de murcha permanente, já não conseguem absorver água na quantidade adequada para o seu metabolismo e transpiração. Contudo, esse conceito de água disponível possibilita a caracterização do solo quanto à sua capacidade de armazenamento de água (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Grande parte da água absorvida pelas plantas é liberada para a atmosfera por meio da transpiração (97%), apenas uma pequena fração permanece na planta para suprir o crescimento (2%) e ser usada na fotossíntese ou em outros processos metabólicos (1%) (TAIZ; ZEIGER, 2013). As plantas absorvem água do solo pelas raízes e a translocam para as folhas, em que é liberada na forma de vapor para atmosfera, estabelecendo-se assim, uma coluna contínua de água, satisfazendo a um gradiente decrescente de potencial hídrico (Ψ_w). A água só é absorvida pela planta se houver um gradiente favorável de Ψ_w entre o solo e a raiz. Caso um solo venha a perder água constantemente por evapotranspiração e

se esse líquido não for repostado adequadamente (seja por precipitação pluvial ou irrigação), as plantas terão dificuldades crescentes de extrair a água para repor àquela transpirada, esse processo acarreta em perda de pressão de turgor ou murchamento, ocasionando déficit hídrico.

Entre os vários fatores estressantes que limitam a produção vegetal, o déficit hídrico ocupa posição de destaque, pois é um fenômeno que ocorre em grande extensão das áreas cultiváveis (NOGUEIRA et al., 2001). Para Levitt (1980), no entendimento das respostas das plantas ao déficit hídrico, é de fundamental importância se quantificar a capacidade de armazenamento de água no solo e analisar a influência dos mecanismos de adaptação das plantas à redução da disponibilidade de água no solo.

2.2 Irrigação no Brasil

A irrigação desempenha papel importante na agropecuária, pois reduz a necessidade de abertura de novas fronteiras agrícolas, uma vez que a agricultura irrigada se torna mais eficiente na produção das culturas em comparação com a agricultura de sequeiro. Em regiões que apresentam períodos de déficit hídrico, o manejo da irrigação é de suma importância para desenvolvimento satisfatório das culturas. Além disso, a cobrança pelo uso da água poderá promover a conscientização dos irrigantes que por sua vez irá proporcionar aumento da eficiência do sistema, resultando em redução do desperdício dos recursos hídricos (BRASIL, 2013).

Segundo dados da FAO (2012), o Brasil está entre os quatro países do mundo com maior área potencial para irrigação, embora apenas uma pequena parte seja utilizada. Esse potencial deve-se tanto à extensão territorial quanto ao conjunto de fatores físico-climáticos favoráveis ao desenvolvimento da atividade. Estima-se que a área irrigada em 2012 seja de 8,3 milhões de hectares,

ou 19,6% do potencial nacional, que é de 29,6 milhões de hectares (BRASIL, 2013).

Apesar da baixa utilização de áreas potencialmente irrigáveis, o setor agrícola é responsável pela maior parte do uso consuntivo da água no Brasil, requerendo maior atenção dos órgãos gestores com vistas ao desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos (BRASIL, 2013).

De acordo com dados da Agência Nacional das Águas (ANA, 2013), a área irrigada no Brasil tem crescido consideravelmente nas últimas décadas. Em 1970 a irrigação correspondia 2,3% da área cultivada, chegando a 6,0% em 1995 e alcançando o patamar de 8,3% em 2012.

A partir de 1980, ocorreu um expressivo incremento das áreas irrigadas, que tem relação com importantes programas criados neste período: Programa Nacional para Aproveitamento Racional de Várzeas Irrigáveis – Provárzeas (1981), Programa de Financiamento de Equipamentos de Irrigação – Profir (1982), Programa Nacional de Irrigação – Proni (1986) e Programa de Irrigação do Nordeste – Proine (1986). Em conjunto, estes programas forneceram marcos, tanto para o investimento direto do setor público em obras coletivas de grande impacto regional, quanto, principalmente, para estimular a iniciativa privada, que atualmente responde por 96,6% das áreas irrigadas (BRASIL, 2013).

2.3 Quantificação da umidade do solo

A umidade do solo é o conteúdo de água presente no espaço poroso do solo (micro e macroporos). O conhecimento e monitoramento dessa propriedade são de fundamental importância para o manejo da irrigação, uma vez que o crescimento e o desenvolvimento adequado das plantas dependem do teor de água no solo (KITIĆ; CRNOJEVIĆ-BENGIN, 2013), além de se empregar os recursos hídricos de forma racional.

Silva et al. (2012) destacam a importância de conhecer o teor de água no solo: determinação do balanço hídrico local, conhecer a “produção” de água para mananciais hídricos e avaliar o momento mais adequado de preparo do solo. Gravados et al. (2012) complementam afirmando que na agricultura, a determinação da umidade é utilizada na tomada de decisão sobre o momento oportuno de irrigar e a quantidade de água a ser aplicada à cultura.

Devido a grande heterogeneidade na distribuição temporal e espacial da umidade no solo e a falta de métodos padronizados para estimar essa propriedade, sua quantificação e utilização em campo é limitada (ENGMAN; CHAUHAN, 1995; WESTERN et al., 2002; MITTELBAACH et al., 2012).

Os métodos para quantificação da umidade de solo são classificados em diretos e indiretos. No método direto a água é extraída do substrato, geralmente pelo aquecimento do solo, dessa forma, o teor de água é determinado pela diferença de massa da amostra no início e no término do procedimento. Já os métodos indiretos fundamentam-se em medidas como a moderação de nêutrons, a resistência elétrica, a constante dielétrica e a tensão da água no solo.

2.3.1 Método gravimétrico (padrão)

A medida de umidade realizada a partir de método direto envolve a remoção da água de uma amostra de solo por evaporação e consequente determinação da quantidade de água removida.

Embora apresente boa precisão, é demorado (de 24 a 48 h). Outro aspecto é a dificuldade de monitoramento da umidade do solo no mesmo local, devido ao seu caráter destrutivo (não torna possível a determinação da umidade do solo no mesmo ponto). Isto é particularmente desvantajoso em locais com grande heterogeneidade espacial e variação temporal em propriedades do solo (BRULAND; RICHARDSON, 2005). Para rápida determinação do teor de

umidade e monitoramento, métodos indiretos podem ser utilizados e calibrados por meio do método padrão.

O método padrão para determinação do teor de umidade de uma amostra de solo é realizado em laboratório, fazendo-se a pesagem do solo úmido e posterior secagem do material em estufa em temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 h, e nova pesagem do material. Com base na Equação 1 obtém-se a umidade:

$$U = \frac{\mu - m_s}{m_s} \quad (1)$$

Em que:

U = umidade do solo, em base peso (g g^{-1});

μ = massa de solo úmido (g);

m_s = massa de solo seco (g).

As amostras de solo utilizadas nesta metodologia são extraídas na profundidade na qual se deseja determinar a umidade, em seguida são acondicionadas geralmente em recipientes de alumínio, podendo ter a sua estrutura deformada, no entanto, deve-se vedar o recipiente a fim de evitar a perda de água por evaporação posteriormente à coleta, conservando-se a umidade antes da pesagem da amostra úmida (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

2.3.2 Sensores para quantificação da umidade do solo

Para ElNesr et al. (2013), muitos métodos não destrutivos tem sido desenvolvidos para medir e monitorar a mudança no teor de água do solo.

Os métodos indiretos são os mais indicados nos estudos de monitoramento de água no solo, devido à praticidade, rapidez e possibilidade de repetição das medidas em um determinado ponto do perfil do solo (SILVA et al.,

2008). Costa (2014) ressalta que, por conta das características vantajosas para o monitoramento da água no solo, os métodos indiretos são bastante empregados em pesquisas e sistemas de agricultura de precisão.

Esses métodos medem a umidade indiretamente, relacionando medidas que dão uma indicação do conteúdo de água do solo, tais como:

- a) Condutividade elétrica de um bloco poroso (blocos de gesso);
- b) Potencial matricial de água no solo (tensiômetro);
- c) Velocidade de pulso eletromagnético (reflectometria no domínio do tempo, TDR);
- d) Reflexão de nêutrons sobre o átomo de hidrogênio (sonda de nêutrons) e;
- e) Reflectometria no domínio da frequência (sensores de capacitância-FDR).

2.3.2.1 Sensor de capacitância (FDR)

Devido à facilidade de medição e capacidade de registro de dados, ausência de potenciais riscos à saúde como os métodos baseados em radiação, os sensores de capacitância estão cada vez mais se tornando o método de escolha (KIZITO et al., 2008; DEAN et al., 2012). As sondas são constituídas de um par de eletrodos que se comportam como um capacitor eletrônico, assim, ocorre a conexão a um circuito LC, em que L é o indutor e C é o capacitor, que resulta nos valores de frequência que dependem da capacitância do solo. Dessa forma, a uma maior capacitância está vinculada a uma maior umidade do solo e conseqüentemente menor frequência do circuito (CRUZ, 2013).

A capacitância é diretamente proporcional a constante dielétrica do meio circundante. Cichota (2003) menciona que, a velocidade de um pulso eletromagnético ao longo de uma linha de transmissão em um meio condutor pode ser calculada pela Equação 2, a qual demonstra que as interações eletromagnéticas com o meio retardam o pulso.

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2)$$

Em que:

v = velocidade do pulso (m s^{-1});

c = velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$);

k = constante dielétrica do material circundante.

Para medir a constante dielétrica do solo, dois condutores de placas são separados por uma distância conhecida com solo inserido entre elas (Figura 1) e uma corrente alternada de alta frequência é aplicada a uma placa e o sinal recebido e medido pela outra placa. A capacitância é calculada e convertida para o teor de umidade do solo (REZAEI, 2012), sendo calculada pela Equação 3.

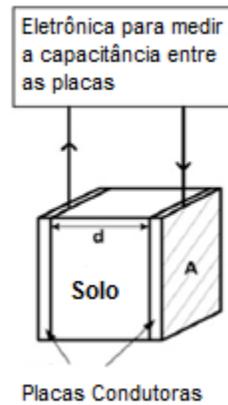
$$C = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

Em que:

C = capacitância (Farad);

Q = carga elétrica (Coulomb);

V = potencial elétrico (Volt).



Fonte: Rezaei (2012).

Figura 1 Esquema de um sensor de capacitância

Sensores capacitivos são uma excelente alternativa, por causa de seu baixo custo, além de permitir contínuo monitoramento, recursos de registro de dados, repetibilidade, e aplicabilidade a uma ampla gama de tipos de solo (SEYFRIED; MURDOCK, 2004).

A interação do sensor com água produz mudança relativamente considerável de capacitância, porque a permissividade relativa da água é muito elevada (cerca de 80) (MARKEVICIUS et al., 2012). Como a constante dielétrica da água é cerca de uma ordem de magnitude maior do que as partículas sólidas e duas ordens maiores do que o ar, uma mudança no teor de água no solo é facilmente detectável por variações na frequência de ressonância (GIRALDI; IANNELLI, 2009).

Os valores de capacitância podem apresentar variação quanto ao tipo de material dielétrico, geometria do capacitor e ainda pela distância entre os eletrodos. Após ser calculada, a capacitância é convertida para o teor de umidade do solo (REZAEI, 2012).

A capacitância elétrica de um capacitor que utiliza o solo como um dielétrico é dependente da umidade presente nesse solo. Quando o condensador está acoplado a um oscilador, formando um circuito elétrico, alterações na

frequência do circuito indicam mudanças na umidade do solo. A frequência de oscilação está restrita dentro de certa gama para determinar a ressonante frequência. Isto dá uma medida do teor de água do solo (MUÑOZ-CARPENA et al., 2004).

Esse método demanda calibração específica para cada tipo de solo, uma vez que a sensibilidade para aberturas de ar, salinidade do solo, temperatura, densidade e teor de argila limitam a utilização deste método (EVETT, 2002; ERLINGSSON et al., 2009).

O sensor 10HS faz parte do grupo de dispositivos ECH₂O (Decagon Devices), porém esse sensor de capacitância foi desenvolvido recentemente. De acordo com Spelman et al. (2013), o sensor em estudo o 10HS apresenta como vantagem a os seus antecessores, um volume de solo maior de influência e menor suscetibilidade a mudanças ambientais e apresenta equações empíricas para estimar a umidade o solo devido a ampla variabilidade de solos existentes (VISCONTI et al., 2014).

O volume de solo de influência do 10HS é de 1L (COBOS; CHAMBERS, 2010). Esse grande volume de influência aumenta a acurácia e precisão das medições dos sensores, reduzindo os efeitos adversos, efeitos de qualquer heterogeneidade dos meios de comunicação do solo imediatamente circundante do sensor, tais como raízes e pedras (SPELMAN et al., 2013).

De acordo com Kizito et al. (2008), o 10HS apresenta maior frequência de medição em comparação com o CE-5 e EC-20, assim esse equipamento é menos suscetível a imprecisão devido a mudanças no seu ambiente circundante, tais como temperatura e salinidade do solo. Outra característica desse sensor é a sua pré-calibração para medir a permissividade dielétrica do solo (DECAGON DEVICES, 2010). Ventura et al. (2010) relata resultados aceitáveis utilizando os sensores capacitivos ECH₂O e EC-5 que são comercializados pelo mesmo fabricante do sensor 10HS. Como desvantagem desse sensor pode ser citado seu

alto custo, que no Brasil é adquirido por cerca de US\$ 200,00 e o coletor de dados (leitor Procheck) por US\$ 760,00.

Os sensores Grove e Eletrodex, possuem design simples e apresentam baixo custo de aquisição (R\$ 25,00 e R\$ 13,00, respectivamente), quando comparados ao 10HS, esse último aspecto pode permitir a viabilidade desses equipamentos para o irrigante.

2.3.2.2 Sensores de resistência elétrica

São sensores que medem a tensão de água no solo, em função das mudanças na umidade do solo, a tensão varia, e, portanto o valor da resistência elétrica (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Por exemplo, o Sensor de Matriz Granular (GMS) ou comercialmente chamado de Watermark, apresenta leitura em cbar (centi-bar). Esse equipamento apresenta matriz granular, geralmente areia, que reduz os problemas inerentes ao bloco de gesso, ou seja, perda de contato com o solo por dissolução e distribuição inconsistente de tamanho de poros. De acordo com Carvalho e Oliveira (2012), esse sensor é constituído de um par de eletrodos altamente resistente à corrosão. Ao ser instalado no solo, uma corrente elétrica é aplicada ao sensor para obtenção da resistência elétrica, e esta é correlacionada com a tensão de água no solo. Os autores ainda comentam que esse sensor deve ser instalado de forma permanente no solo, possibilitando conhecer, a qualquer instante, a tensão de água no solo, e conseqüentemente, a umidade.

Esse sensor é de fácil instalação, fornece resultados confiáveis, exige pouca manutenção, pode ser integrada em sistemas de sensores sem fio (TERZIS et al., 2010; THOMPSON et al., 2006, 2007b; VELLIDIS et al., 2008). O Watermark permite medidas de tensão na faixa de 0 a 200 kPa (CENTENO et al., 2010).

2.3.2.3 Potencial matricial da água do solo

O tensiômetro trabalha na faixa de tensão entre 0 e 80 kPa (COSTA et al., 2002). O equipamento consiste de uma cápsula porosa, de cerâmica em contato com o solo, ligada a um vacuômetro, por meio de um tubo de PVC completamente cheio de água (REICHARDT; TIMM, 2004). Ao ser inserido no solo, a água do tensiômetro entra em contato com a solução presente no solo e o equilíbrio tende a se estabelecer. Qualquer mudança no teor de água no solo, (consequentemente, em seu estado de energia), será transmitida à água no interior da cápsula, sendo indicada pelo dispositivo de leitura.

A cápsula do tensiômetro funciona como uma membrana semipermeável, permitindo a livre passagem de água e íons, não permitindo a passagem de ar e partículas de solo, dentro da faixa de tensão de operação (GOMIDE, 2000).

2.3.2.4 Sondas de nêutrons

A sonda de nêutrons consiste essencialmente de duas partes: a placa com a sonda e o sistema de contagem eletrônica. A sonda é um cilindro metálico vedado, de 30 a 50 mm de diâmetro e de 200 a 300 mm de comprimento. Este equipamento contém uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos, um detector de nêutrons lentos e um pré-amplificador. O sinal do pré-amplificador passa por 5 a 20 m de comprimento no cabo para o sistema de contagem eletrônica (KODIKARA, 2014).

Esse aparelho mede a redução da velocidade dos nêutrons por intermédio de átomos de hidrogênio presente no solo. Existe uma correlação estreita entre a quantidade de nêutrons moderados a ser medida no aparelho e a concentração de hidrogênio presente no solo (BERNARDO; SOARES;

MANTOVANI, 2008). Ao passo que a principal fonte de hidrogênio medida é proveniente da água contida no solo, a proporção de nêutrons moderados, está relacionada com o conteúdo de água no substrato.

A técnica da moderação de nêutrons pode ser utilizada para determinar o conteúdo de água em determinada profundidade no solo. Todavia, sua utilização apresenta restrição, devido à fonte radioativa, a utilização dessa técnica necessita do conhecimento de leis e normas que regulamentam e fiscalizam o uso desses materiais, constituindo uma grande desvantagem (TEIXEIRA et al., 2005).

2.3.2.5 TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo)

SANTANA et al. (2012) citam que o equipamento TDR é composto por um testador de cabos e guias de ondas, denominados sondas de TDR. As guias são compostas pelo prolongamento de um cabo que se conecta às hastes. Para o funcionamento do sensor deve ocorrer a emissão de um pulso eletromagnético advindo do testador de cabos que deve percorrer toda a extensão do cabo coaxial até as hastes.

Os sensores do tipo TDR medem a velocidade da propagação das ondas eletromagnéticas nas hastes que ficam em contato íntimo com o solo. O pulso de voltagem emitido ao longo da haste metálica de comprimento irá propagar-se até o final desta, onde encontrará um estrangulamento eletrônico, causado pela mudança de impedância, ou seja, a descontinuidade da haste metálica, provocando o retorno de um pulso ressonante até o início. Desta forma, a constante dielétrica do meio que contém a haste pode ser determinada através do tempo gasto entre a emissão do pulso e a percepção do retorno do eco (CICHOTA, 2003). A alteração de velocidade ocorre devido à diferença entre as constantes dielétricas do ar, água e da matriz do solo (ROQUE, 2008), sendo que a água possui valor grande de constante dielétrica em comparação com os outros

constituintes do solo. A velocidade do pulso na sonda é medida e correlacionada com a umidade do solo, ao passo que, uma velocidade mais baixa indica um solo mais úmido (DOBRIYAL et al., 2012).

Esse método apresenta como vantagens à alta resolução temporal, a rapidez de aquisição, a repetibilidade de medições (precisão) e a não destruição da amostra. De acordo com Silva (2005), a reflectometria no domínio do tempo é também largamente utilizada para medir a densidade, condutividade elétrica e deformação de massa de rocha.

No entanto essa técnica possui certos inconvenientes, Muñoz-Carpena (2015), citam alguns: apresenta custo relativamente alto devido à complexidade da eletrônica envolvida; apresenta baixo volume de solo de detecção (raio com cerca de 30,5mm em torno comprimento de guias de onda); apresenta aplicabilidade limitada em solos altamente salinos e com alto teor de argila; requer calibração específica do solo necessária para os solos com grandes quantidades de água ligada (por exemplo, aqueles com alto teor de matéria orgânica, solos vulcânicos, etc).

2.3.3 Calibração de sensores

A calibração dos métodos indiretos para estimativa da umidade do solo é realizada comumente pelo método gravimétrico (método padrão).

Para Dorneles e Ruivaro (2012), nos métodos dielétricos, a estimativa de uma curva de calibração de umidade do solo para um referido sensor representa a relação entre o conteúdo volumétrico de água e a constante dielétrica do solo (determinada pelo instrumento). Neste procedimento, origina-se um modelo empírico para um solo em específico. No entanto, o termo “curva de calibração” é considerado de forma indevida, pois não ocorre caracterização no sentido

metrológico, e sim a obtenção de uma equação ajustada por modelo de regressão, seja ela linear ou não linear (DORNELES; RUIVARO, 2012).

Dependendo da precisão requerida e em razão da variabilidade das características físicas que os solos possuem, os sensores utilizados para estimar de forma indireta o teor de água no solo requerem calibrações locais, seja em campo ou em laboratório, a fim de se aumentar a precisão na medida do parâmetro citado (CRUZ, et al., 2010; BULLIED et al., 2007; DOLEZAL et al., 2008). Mortl et al. (2011) mencionam que a maioria das sondas dielétricas comercialmente disponíveis de fabricantes especializados utilizam equações de calibração.

De acordo com Kinzli, Manana e Oad (2012), a calibração de sensores de capacitância e TDR realizada em laboratório e em campo podem seguir a mesma metodologia. Procede-se uma série de medições no solo variando-se o nível de umidade e posteriormente são ajustadas equações de regressão a partir dos dados coletados. Este método tem sido bem sucedido para vários sensores capacitivos e TDR em laboratório e em nível de campo conforme relatado por Seyfried e Murdock (2004), Veldkamp e O'Brien (2000), Geesing, Bachmaier e Schmidhalter (2004), Walker, Willgoose e Kalma (2004).

Kinzli, Manana e Oad (2012) ao compararem a calibração do sensor EC-20 realizada em laboratório e em campo para vários tipos de solos, verificaram que a calibração em laboratório apresentou maior exatidão quando comparada com a realizada em campo. Os autores observaram que o erro médio absoluto do conteúdo de água volumétrica para calibração em campo foi de campo $0,430 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,012 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a calibração em laboratório.

É sabido que a frequência de oscilação dos sensores de capacitância diminui com o aumento do teor de umidade. No entanto, essa frequência de oscilação é também afetada pelo conteúdo de minerais de argila e pela temperatura (EVETT et al., 2006; HANSON; PETERS, 2000). Böhme, Becker e

Diekkrüger (2013) também mencionam que solos com alto teores de umidade, sais e matéria orgânica podem influenciar nas medições de sondas do tipo FDR (Reflectometria no Domínio da Frequência).

Estudos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver modelos de calibração para os equipamentos de capacitância e FDR (KARGAS; SOULIS, 2012; LINMAO et al., 2012; MINET et al., 2010; CRUZ et al., 2010; SILVA JUNIOR et al., 2013).

Os sensores de TDR, apesar de possuírem modelos empíricos para a conversão da constante dielétrica do solo em teor volumétrico de água, necessitam de obtenção de equações de calibração para condições de solo específicas, devido à heterogeneidade de seus atributos físicos e químicos. Vários pesquisadores têm realizado esse procedimento, dentre eles: Calamita et al. (2012), Wang et al. (2013), Blonquist et al. (2011), Dobriyal et al. (2012), Villwock et al. (2004), Kaiser et al. (2010) e Soncela et al. (2013).

Exemplificando, Miranda et al. (2007) ajustaram equações de calibração do sensor dielétrico ECH₂O, modelo EC-10, para dois tipos de solos (Neossolo Quartzarênico e Cambissolo). Os resultados mostraram que, quando devidamente calibrado, esse sensor pode ser utilizado de forma satisfatória para mensuração da umidade do solo. A avaliação do desempenho deste mesmo sensor também foi realizada por Dorneles e Ruivaro (2012), esses autores mencionam que foi possível obter uma equação com nível de precisão acima de 97%.

Andrade Júnior et al. (2007) ao calibrarem uma sonda de capacitância (Diviner 2000®) utilizada em um Latossolo Amarelo proveniente do Litoral Piauiense (utilizando o método padrão de estufa), obtiveram uma equação ajustada por análise de regressão, relacionada significativamente com as medidas do equipamento, com alta correlação e coeficiente de determinação.

Silva et al. (2012) realizaram este procedimento para uma sonda de capacitância (Delta-T Profile probe PR2/6) utilizada em Latossolo Vermelho distrófico, muito argiloso, no município de São Roque de Minas-MG. Os autores relataram que as calibrações padrão do fabricante não se mostraram adequadas para emprego nas condições de manejo avaliadas (diferentes locais e profundidades de amostragem).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Relação-Solo-Água-Planta, Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras, que está situado na região sul de Minas Gerais, tendo como referência as seguintes coordenadas geográficas: latitude 21° 14' S, longitude 45° 00' W Gr. e 918 m de altitude.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Lavras é Cwa (DANTAS et al., 2007), ou seja, clima temperado chuvoso (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso, subtropical.

Foram utilizados no experimento três diferentes classes de solos: Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico (Embrapa, 2013), ambos coletados no Campus da Universidade Federal de Lavras.

As três diferentes classes de solo foram escolhidas por serem representativas da região de Lavras e apresentam características potenciais à prática da irrigação. Os mesmos foram coletados no campus da Universidade Federal de Lavras a uma profundidade de 0 a 30 cm e passados em malha de 2 mm e secos à sombra em camada fina.

As análises físicas, físico-hídricas e de fertilidade do solo foram realizadas nos laboratórios de Física e Fertilidade do Solo, respectivamente, no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Foram utilizados no experimento três sensores capacitivos-FDR para estimativa da umidade do solo: Sensor 10HS (Decagon Devices, Pullman, WA) (Figura 2); dois sensores de baixo custo o Grove e o Eletrodex, adquiridos no comércio de instrumentos eletrônicos do Estado de São Paulo e Minas Gerais, respectivamente (Figura 3).

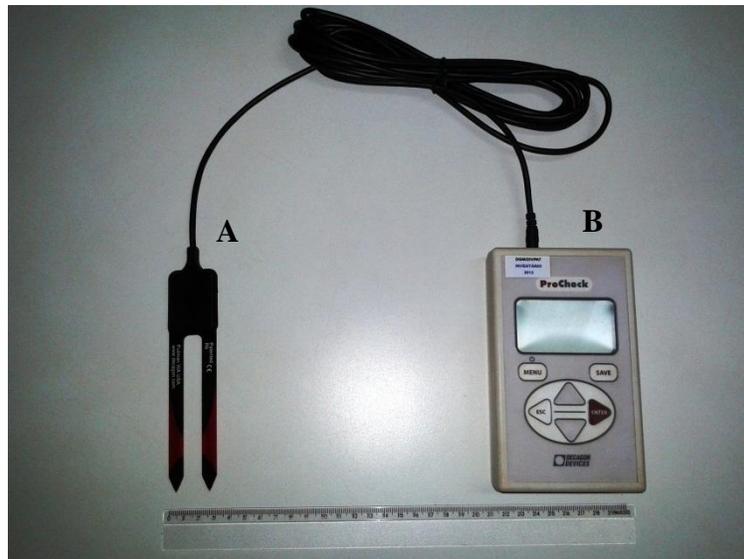


Figura 2 Sensor de capacitância 10HS (A) e o leitor digital Procheck (B)

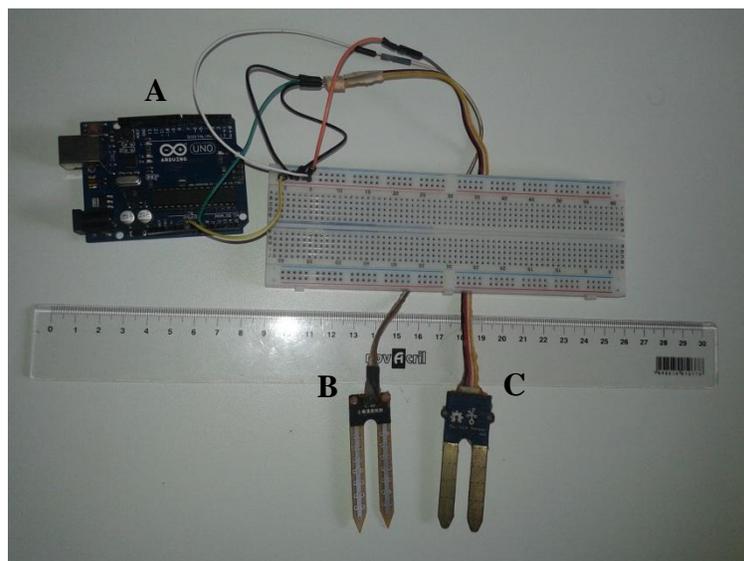


Figura 3 Microcontrolador Plataforma Arduino Uno do fabricante Atmel (A); Sensores capacitivos de “baixo custo” Grove (B) e Eletrodex (C)

Os três sensores, (10HS, Grove e Eletrodex) foram calibrados em três diferentes classes de solo (Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho

distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico) sendo que cada classe foi submetida a sete diferentes teores de umidade no solo.

Cada unidade experimental foi constituída de um vaso plástico preenchido com 10L de cada um dos diferentes solos, sendo constituído de três repetições. Este volume do recipiente foi selecionado para preconizar as diretrizes da Decagon para a calibração do 10HS, que recomendam 10 cm de raio mínimo de solo em torno do sensor, e uma profundidade de 2 cm abaixo da extremidade da haste do sensor que deve estar completamente inserida no solo (COBOS, 2008). Essa especificação tem por objetivo eliminar interferências devido ao grande volume de amostragem do 10HS.

Como mencionado anteriormente, foram utilizadas no experimento sete níveis umidade para os três tipos de solo. Para tanto, os teores de água no solo ficaram compreendidos no intervalo de disponibilidade total de água para as plantas, ou seja, entre a umidade referente ao Ponto de Murcha Permanente (PMP) e a umidade do solo na Capacidade de Campo (CC), uma vez que o intuito do trabalho é a calibração dos sensores para fins de irrigação. A calibração dos sensores foi realizada seguindo metodologia (modificada) descrita por Kinzli (2012), citado por Spelman et al. (2013).

Foi calculada a disponibilidade total de água do solo pela Equação4:

$$DTA = U_{CC} - U_{PMP} \quad (4)$$

Em que:

DTA= disponibilidade total de água no solo ($g\ g^{-1}$)

U_{CC} = umidade gravimétrica do solo ($g\ g^{-1}$) na capacidade de campo (10 kPa);

U_{PMP} = umidade gravimétrica do solo ($g\ g^{-1}$) no ponto de murcha permanente (1500 kPa).

Em seguida foram estabelecidos valores de porcentagens da disponibilidade total de água no solo (DTA), acarretando nos sete diferentes teores de água no solo, que foram:

-0% da DTA, ou seja, a umidade referente ao Ponto de Murcha Permanente;

-20%, 40%, 60%, 80% da DTA;

-100% da DTA, ou seja, a umidade referente à Capacidade de Campo do solo;

-120% da DTA, ou seja, 20% de umidade acima da capacidade de campo.

Para definir o teor de umidade do solo para cada faixa (porcentagem) de água disponível total descrita acima, utilizou-se a Equação 5:

$$U = (f \cdot DTA) + U_{PMP} - U_r \quad (5)$$

Em que:

U = umidade do solo referente a determinado teor de água ($g\ g^{-1}$);

f = porcentagem de água disponível total (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2);

U_{PMP} = umidade gravimétrica do solo ($g\ g^{-1}$) no ponto de murcha permanente (1500 kPa);

U_r = Umidade residual ($g\ g^{-1}$).

A umidade residual compreende a umidade inicial do solo, uma vez que o mesmo não se encontrava totalmente seco, sendo determinada pelo método Padrão de estufa.

No cálculo do volume de água necessário para umedecer o solo, nas diferentes faixas de umidade foi utilizada a Equação 6:

$$VA = U \cdot ms \quad (6)$$

Em que:

VA = volume de água (mL);

U = umidade do solo referente a determinado teor de água (g g^{-1});

Ms = massa de solo utilizada no teste (g).

A calibração dos sensores de baixo custo foi realizada simultaneamente no mesmo teste, ou seja, no mesmo vaso, já as calibrações do sensor 10HS foi efetuada separadamente, no entanto, ambos os testes seguiram a mesma metodologia.

Inicialmente foi determinada a massa do solo por meio de uma balança, e em seguida efetuou-se o cálculo do volume de água necessário para elevar a umidade de cada solo até o valor estipulado. Para isso foi subtraída a umidade inicial de cada solo (umidade residual, mencionada anteriormente). Posteriormente, o solo foi depositado sobre um recipiente plástico e por meio de uma proveta graduada foi adicionado o volume de água para que o mesmo atingisse a umidade referente ao Ponto de Murcha Permanente (conforme exposto na Equação 3 e 4). Em seguida, o solo e a água foram misturados manualmente por cerca de 20 minutos até a obtenção da homogeneidade da amostra.

Depois desse processo, o solo foi transferido para os três vasos (três repetições) e levemente compactado até o volume de 10L. Em seguida esses vasos foram depositados sobre a bancada do laboratório e efetuaram-se as leituras de umidade para cada um dos sensores em estudo. As leituras do sensor 10HS foram realizadas com o leitor Procheck (Decagon Devices, Pullman, WA), expressa em “dados brutos” (“raw counts”). Para leitura de dados dos Grove e Eletrodex foi utilizado a Plataforma Arduino Uno (leitura expressa em bytes), que consiste de uma placa de circuitos com um microcontrolador do fabricante Atmel.

Os valores de umidade informados pelos leitores foram considerados quando houve estabilização da mesma, ou seja, quando houve constância do valor observado, e as mesmas foram tomadas a 15 cm de profundidade. Optou-se por essa profundidade por representar o sistema radicular efetivo das espécies olerícolas.

Posteriormente às leituras, efetuou-se a extração de amostras de solo para mensuração da umidade gravimétrica, que foi determinada pelo método padrão de estufa, de acordo com a recomendação proposta pela Embrapa (1997), como exposto anteriormente na Equação 1.

As amostras de solos foram coletadas nas mesmas profundidades que se efetuaram as leituras dos sensores e ao redor das hastes dos sensores. Também foi determinada a massa específica do solo, pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), de acordo com a Equação 7:

$$D_s = \frac{m_s}{v} \quad (7)$$

Em que:

D_s = massa específica do solo (g cm^{-3});

m_s = massa de solo seco (g);

v = volume do anel (cm^3).

Para tal procedimento, efetivou-se a retirada de uma amostra de solo a 15 cm de profundidade e posteriormente foi seco em estufa.

Após a mensuração da umidade gravimétrica (Equação 1) e massa específica do solo (Equação 7) torna-se possível a determinação da umidade volumétrica conforme Equação 8:

$$\theta = D_s \cdot U \quad (8)$$

Em que:

θ = umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

D_s = massa específica do solo (g cm^{-3});

U = umidade gravimétrica (g g^{-1}).

Posteriormente a realização desse processo, o solo foi transferido dos vasos para o recipiente plástico e adicionado a este, o volume de água necessário para que fosse atingida 20% da água disponível total, em seguida efetuou-se a homogeneização desse solo e novamente tomaram-se as leituras e a retirada das amostras para determinação de umidade e massa específica do solo, conforme descrito anteriormente. Esse procedimento foi realizado, sucessivamente para as umidades de interesse até que o último teor de água fosse alcançado.

Para correlacionar os valores das leituras (“dados brutos”, do sensor 10HS e “bytes” dos sensores Grove e Eletrodex) informados pelos aparelhos, com os resultados obtidos pelo método padrão de estufa (gravimétrico), foram ajustadas equações de ajustes e a qualidade do ajuste foi verificada pelo coeficiente de determinação (R^2), com auxílio do aplicativo Microsoft Excel e foi testada a significância do modelo pelo teste F, por meio do programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013). Dessa forma, procedeu-se a calibração dos sensores nos três diferentes solos. Também foi realizada, a comparação entre a curva de pré-calibração do fabricante (Decagon Devices) com a equação de ajuste realizada em laboratório para o sensor 10HS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados, os valores referentes à análise granulométrica (porcentagem), massa específica do solo (g cm^{-3}) matéria orgânica (dag kg^{-1}) e umidade do solo referente à capacidade de campo (g g^{-1}) e ponto de murcha permanente de cada solo (g g^{-1}).

Tabela 1 Atributos físico-hídricos referentes ao Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico

Classes de solos	Análise granulométrica			Ds ⁽¹⁾ g cm ⁻³	MO ⁽²⁾ dag kg ⁻¹	CC ⁽³⁾ g g ⁻¹	PMP ⁽⁴⁾
	Areia	Silte	Argila				
	----- % -----						
Argissolo	52	12	36	1,26	2,48	0,242	0,146
Latossolo	10	29	61	1,09	2,23	0,367	0,250
Nitossolo	34	13	53	1,27	2,87	0,308	0,185

⁽¹⁾Ds = Massa específica do solo; ⁽²⁾MO = matéria orgânica do solo; ⁽³⁾CC = umidade no solo na capacidade de campo (tensão de 10 kPa); ⁽⁴⁾PMP = umidade no solo no ponto de murcha permanente (tensão de 1500 kPa).

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados da análise química das três classes de solos utilizados na calibração dos sensores. Como pode ser observado na Tabela 1, os solos que apresentam maiores teores de argila (Latossolo e Nitossolo) resultaram em maior retenção de água no solo em relação ao Argissolo que possui 36% dessa fração granulométrica. Nota-se ainda que o Nitossolo contém o maior teor de matéria orgânica ($2,87 \text{ dag kg}^{-1}$), Conceição et al. (2005) menciona que maiores teores de matéria orgânica estão vinculados a maior capacidade de retenção de água dos solos.

Ayers e Westcot (1985) mencionam que solos salinos são aqueles cuja condutividade elétrica (CE) da solução de solo saturada é maior que 4 dS m^{-1} , e cuja porcentagem de sódio trocável é maior que 15%. Normalmente, o pH é maior que 8,5. Nota-se, portanto que a CE do Argissolo, latossolo e Nitossolo (Tabela 2) apresentam valores inferiores a 4 dS m^{-1} , (sendo 0,07, 0,11 e 0,07

respectivamente), esses solos não apresentam porcentagem e sódio trocável maior que 15 %, uma vez que o teor desse elemento é nulo nos solos (Tabela 2) e o pH dos solos são inferiores a 8,5 conforme pode ser observado na Tabela 2. Dessa forma, os solos em estudo apresentam baixos níveis de salinidade, sendo classificados como não salinos. Portanto, pode-se inferir que no presente estudo, não houve influência da salinidade na estimativa da umidade do solo.

Waldschmidt (2008) destaca a influência da salinidade na propriedade dielétrica da água, em função da alteração da estrutura natural de suas moléculas, promovendo redução da permissividade do meio. O efeito da salinidade na estimativa do conteúdo de água do solo foi relatado por Barbosa (2011), o qual verificou uma subestimativa do conteúdo de água com incremento da salinidade. Fares et al. (2009) e Baumhardt et al. (2000) também relatam influência desse atributo na estimativa da umidade do solo.

Tabela 2 Resultado da análise química do Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e do Nitossolo Vermelho eutroférico

Classes de solos	pH	-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol dm ⁻³ -----			
		K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al
Argissolo	4,9	28,00	0,56	0,00	0,80	0,60	0,40	4,04
Latossolo	6,0	30,00	1,13	0,00	3,00	1,30	0,00	1,33
Nitossolo	6,9	66,00	1,13	0,00	3,10	1,40	0,00	0,95

Classes de solos	SB	t	T	V	m	P-Rem
Argissolo	1,47	1,47	5,51	26,71	21,39	13,75
Latossolo	4,38	4,38	5,71	76,65	0,00	1,43
Nitossolo	4,67	4,67	5,62	83,08	0,00	11,37

Classes de solos	Zn	Fe	Mn	Cu	B	C.E
Argissolo	0,28	47,95	27,70	0,95	0,21	0,07
Latossolo	0,97	88,26	69,76	6,78	0,28	0,11
Nitossolo	2,03	26,77	53,52	2,13	0,24	0,07

pH em água, KCl e CaCl₂- Relação 1:2,5; Ca-Mg-Al- Extrator: KCl- 1 mol L⁻¹; SB: Soma de bases trocáveis; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; P-rem: Fósforo Remanescente; S-extrator: Fosfato monocálcio em ácido acético; P- Na- K- Fe- Zn- Mn- Cu: Extrator Mehlich 1; H⁺ Al- Extrator: SMP; CTC(t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; V: índice de Saturação de Bases; B: Extrator água quente; C.E: Condutividade Elétrica.

Nas Figuras 4,5 e 6 são apresentadas as curvas com as respectivas equações de calibração do sensor 10HS, para os três diferentes solos estudados. Na Figura 6 é apresentada a curva de calibração realizada em laboratório, aglomerando os resultados obtidos para os três tipos de solo em conjunto e a curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS.

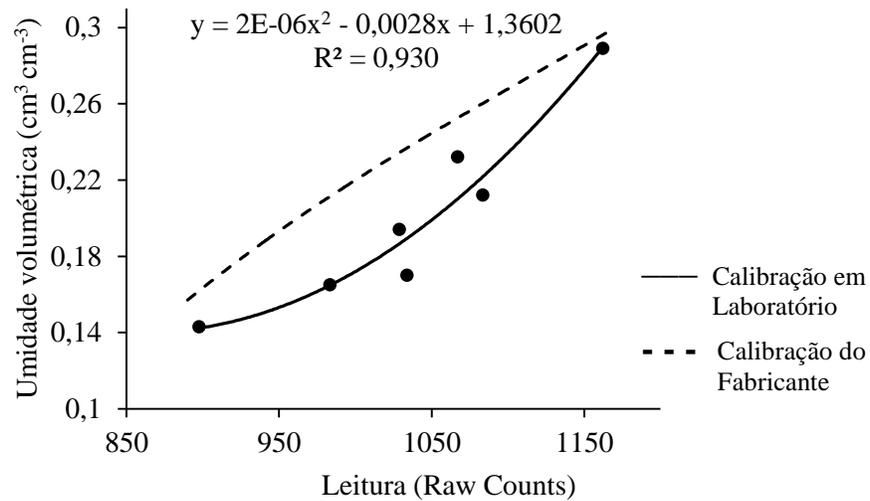


Figura 4 Curva de calibração com sua respectiva equação linear de 2º grau, obtida em laboratório e curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, para o Argissolo Vermelho distrófico

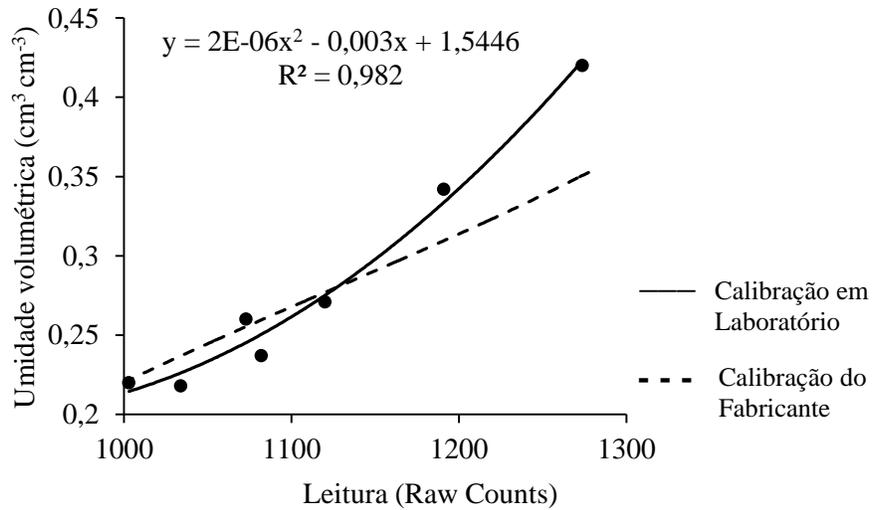


Figura 5 Curva de calibração com sua respectiva equação linear de 2º grau, obtida em laboratório e curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, para o Latossolo Vermelho distroférico

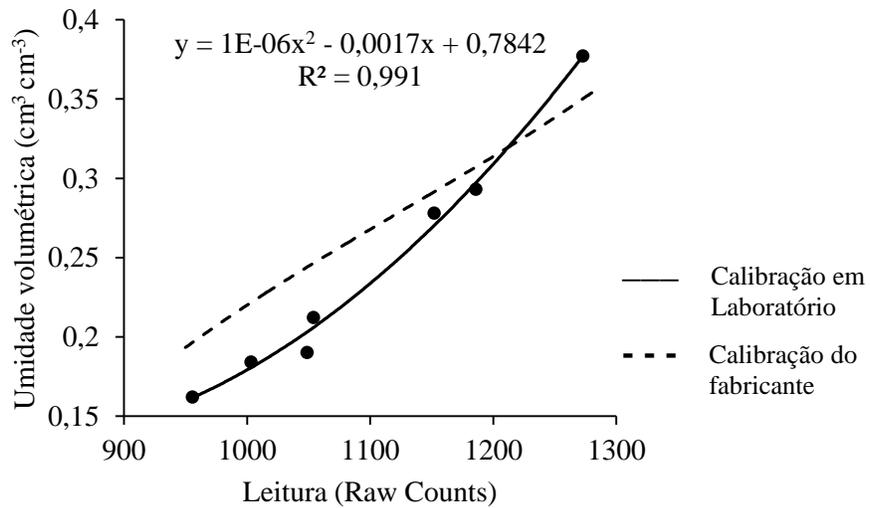


Figura 6 Curva de calibração com sua respectiva equação linear de 2º grau, obtida em laboratório e curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, para o Nitossolo Vermelho eutroférico

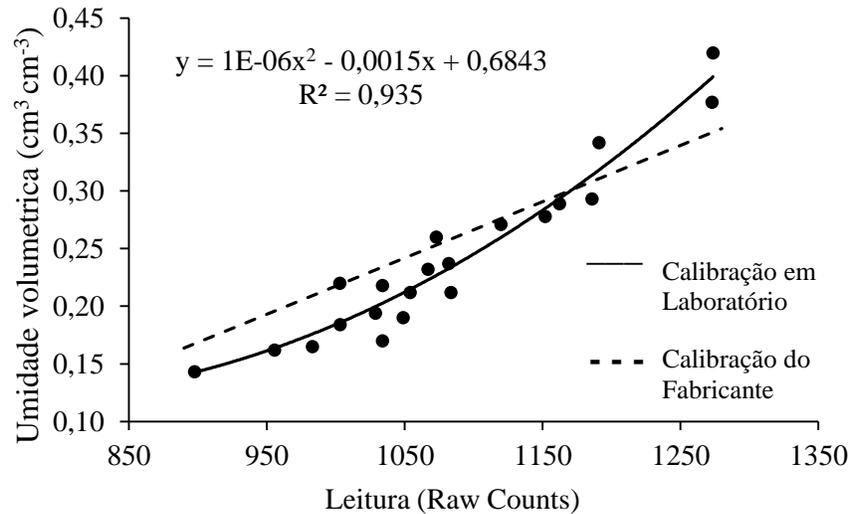


Figura 7 Comparação da curva de calibração realizada em laboratório para os três tipos de solos em conjunto (Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distrófico e Nitossolo Vermelho eutrófico), com a curva de calibração fornecida pelo fabricante, referente ao sensor 10HS

Observa-se nas Figuras 4, 5 e 6 que a relação entre a leitura do sensor 10HS e valores de umidade volumétrica foi ajustada, por uma equação polinomial de segundo grau, com elevado grau de ajuste.

Foram atribuídos valores acima de 0,9 para que o coeficiente de determinação (R^2) fosse considerado elevado para as equações de calibração referente aos três solos envolvendo os três sensores.

Nota-se que o R^2 para ambos os solos foram elevados, apresentando valores de 0,93 (para o Argissolo); 0,98 (para o Latossolo) e 0,99 (para o Nitossolo). Principalmente, para os dois últimos solos o valor de R^2 apresentou-se bem próximos de 1, superiores ao Argissolo.

Ao analisar as Figuras 4, 5 e 6, verifica-se que a curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS não coincide com a curva de

calibração executada no experimento, ou seja, o comportamento de ambas as curvas é divergente. Portanto, a calibração proposta pelo fabricante do sensor 10HS não deve ser aplicada nos solos em questão, tornando-se necessária a realização de uma calibração específica para os solos em estudo.

Na Figura 4, a curva de calibração efetuada para o Argissolo, a umidade foi superestimada pela equação do fabricante. No entanto, essa superestimativa da umidade tende a ser reduzida conforme se aumenta o teor de água no solo. De acordo com os dados, a equação fornecida pelo fabricante do sensor 10HS superestimou a umidade em até $0,067 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, que confere um erro de 30%, acarretando em um erro absoluto médio de aproximadamente $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Para o Latossolo Vermelho distroférico (Figura 5) a curva de calibração realizada em laboratório apresentou comportamento diferente daquele descrito para o Argissolo. Neste solo, a umidade foi levemente superestimada para as menores umidades e para os maiores teores de água a equação do fabricante passou a subestimar a umidade. A equação do fabricante chegou a subestimar a umidade em $0,069 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ que representa 20% e permitiu erro absoluto médio aproximadamente de $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Na Figura 6, a calibração do sensor 10HS realizada para o Nitossolo Vermelho eutroférico apresentou comportamento semelhante ao observado para o Latossolo Vermelho distroférico, ou seja, verificou-se que a umidade foi superestimada quando o solo apresentou menor umidade e quando o solo tornou-se mais úmido a umidade foi subestimada de acordo com a equação do fabricante. A equação do fabricante superestimou em $0,054 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ o que corresponde a 19% e proporcionou erro absoluto médio de aproximadamente $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Na Figura 7, foi gerada uma única equação de calibração a fim de abranger os três solos simultaneamente. Essa equação possui coeficiente de

determinação elevado (0,93), semelhante aquele apresentado pelo Argissolo, e inferior ao R^2 do Latossolo e Nitossolo.

Os resultados obtidos demonstram que a resposta desse sensor à umidade varia com o tipo de solo. Nesse sentido, fica evidente a necessidade de calibração específica para cada classe de solo, especialmente ao tratar-se de elevado grau de precisão na determinação do teor de umidade, como é o caso da irrigação de precisão. Miranda et al. (2007) ao calibrar o equipamento ECH₂O (Decagon Devices) em dois solos, relataram que para o Cambissolo, o sensor apresentou resposta linear com R^2 de 0,98 e para o Neossolo Quartzarênico, os autores descrevem que a equação de ajuste apresentou comportamento quadrático com R^2 de 0,94. Os autores ainda mencionam que a equação recomendada pelo fabricante diferiu das realizadas no estudo. Tal fato segundo os autores implica na necessidade de calibração específica para cada solo para que se alcance maior exatidão da umidade.

O sensor 10HS apresentou uma resposta bastante satisfatória à variação de umidade, especialmente no Latossolo e no Nitossolo (ambos obtiveram elevados coeficientes de determinação), comprovando dessa forma que o sensor apresenta bom desempenho nos solos testados.

De modo geral, nota-se que menores teores de água no solo acarretam em superestimação da umidade, pela equação do fabricante, e ao passo que quando o solo torna-se mais úmido há uma tendência de subestimação dessa umidade, como pode ser verificado nas Figuras 4,5 e 6.

Spelman et al. (2014) testaram o sensor 10HS em quatro solos agrícolas representativos da região do Sudoeste da Flórida nos Estados Unidos. Os autores afirmaram que a equação fornecida pelo fabricante não determina com precisão a umidade do solo dentro do intervalo que é especificado pelo equipamento ($\pm 3\%$), superestimando o teor de água no solo em todas as leituras realizadas. Essa constatação implica em calibração específica do sensor para cada classe de

solo. No entanto, verificou-se que todos os solos testados se comportam de forma muito semelhante, permitindo o desenvolvimento de uma equação de calibração (linear de 1º grau) para uso único nesses solos, apresentando alto coeficiente de determinação (0,98).

Na Tabela 3 estão apresentados os dados de significância do modelo de regressão para os três solos estudados. O modelo linear de segundo grau foi escolhido por apresentar bom ajuste. Nota-se que o teste foi significativo para os três solos ($P < 0,01$).

Tabela 3 Teste de significância do modelo linear (de segundo grau) do sensor 10HS para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico e dos três solos simultaneamente

Fonte de variação	Quadrado médio	F	Pr>F
Argissolo	0,0067417	26,647	0,0049
erro	0,0002530		
Latossolo	0,0067446	26,810	0,0048
erro	0,0002516		
Nitossolo	0,017594	233,64	7,204E ⁻⁰⁵
erro	0,0002516		
três solos	0,049488	129,73	2,035E ⁻¹¹
erro	0,000381		

Uma possível razão para o sensor 10HS ter apresentado desempenho superior no trabalho de Spelman et al. (2014), em relação ao presente trabalho pode ser devido ao fato dos solos deste experimento possuírem textura argilosa (conforme pode ser observado na Tabela 1), enquanto os solos do Sudoeste da Flórida possuírem textura arenosa. Kaiser et al. (2010) relatam um acréscimo da constante dielétrica para teores iguais de umidade volumétrica, proporcional ao aumento do teor de argila e óxidos de ferro presentes no solo. Ainda sobre a influência do teor de argila no desempenho de sensores, Bohl e Roth (1994) mencionam a ocorrência de um comportamento anormal da constante dielétrica da água, em contato com partículas coloidais do solo (argila e matéria orgânica).

Nas condições que foram realizadas as calibrações para o Argissolo, Latossolo e Nitossolo, não houve a justaposição da curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor 10HS, com aquela obtida em laboratório em nenhum dos três solos realizados. Logo, torna-se necessário a calibração específica em cada um dos solos, uma vez que a utilização da equação do fabricante ocasiona superestimação ou subestimação da umidade, apresentando-se inviável para a estimativa correta do teor de água no solo.

Diferentemente do sensor 10HS, os sensores de baixo custo Eteodex e Grove, não possuem equações de pré-calibração fornecidas pelos fabricantes. Para a calibração dos sensores foram ajustadas as equações lineares nos três solos estudados (Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutrófico), visto que este tipo de equação apresentou o melhor ajuste.

Nas Figuras 8, 9 e 10 estão apresentadas as curvas, e as equações de calibração e coeficiente de determinação (R^2) para o sensor Eteodex, nos três diferentes solos: Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico, respectivamente.

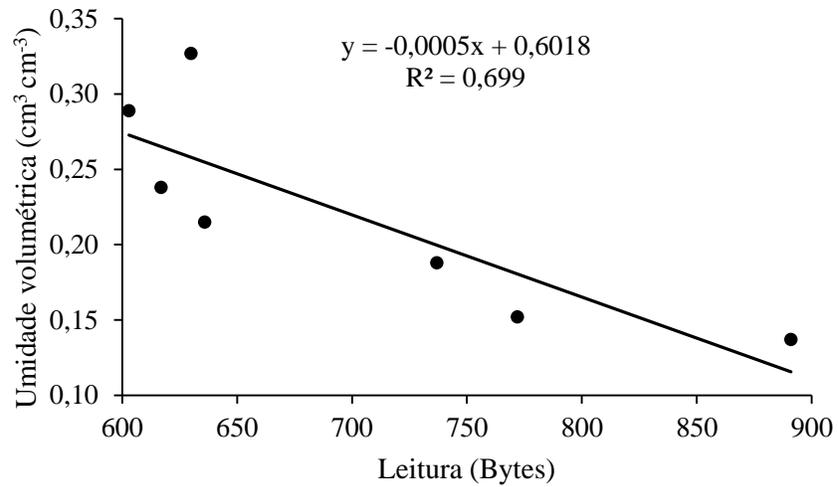


Figura 8 Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Argissolo Vermelho distrófico

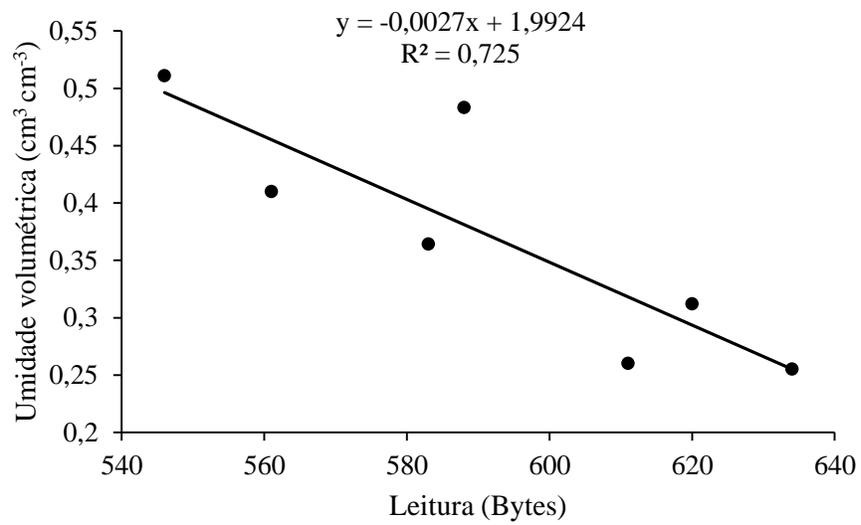


Figura 9 Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Latossolo Vermelho distroférico

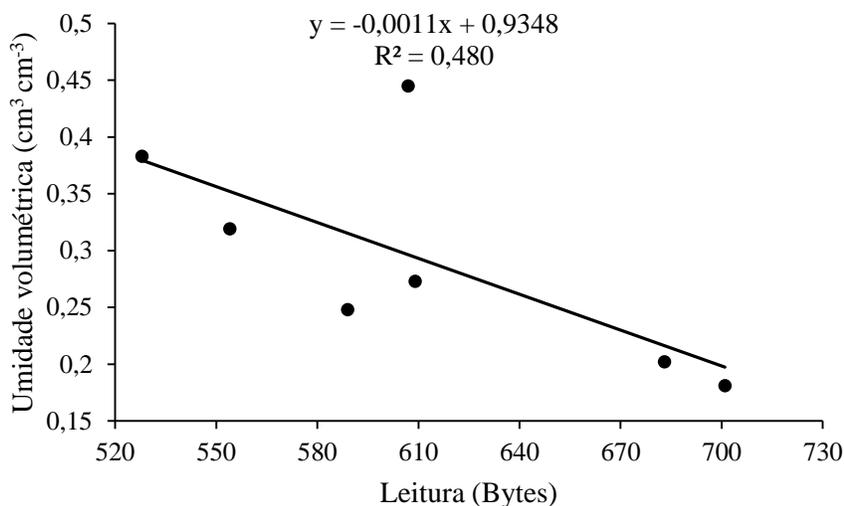


Figura 10 Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Eletrodex para o Nitossolo Vermelho eutroférico

Conforme observado nas Figuras 8, 9 e 10 que demonstram a calibração do sensor Eletrodex, o comportamento das leituras (em bytes) tendem a apresentar valores menores quando a umidade volumétrica do solo aumenta, ou seja, ajuste linear decrescente. Os coeficientes de determinação não se mostraram elevados, apresentando valores de 0,70, 0,72 e 0,48 para o Argissolo, Latossolo e Nitossolo, respectivamente.

A curva de calibração apresentou-se razoável para o Argissolo e Latossolo, em que a equação explicou 70% e 72% da variação da umidade do solo, respectivamente, já para o Nitossolo a equação explicou apenas 48% da variação da umidade do solo.

É possível notar que para o Argissolo e Nitossolo submetido ao maior teor de água no solo (120% da DTA) a leitura do sensor apresenta comportamento anormal, esse último ponto não segue a tendência dos anteriores, tal fato contribuiu para redução do coeficiente de determinação das equações de calibração nesses dois solos. Sendo assim, esse sensor apresenta desempenho

comprometido nesses dois solos no maior nível de umidade. Nesse contexto, Böhme, Becker e Diekkrüger (2013) citam que solos com alto teores de água podem influenciar nas medições de sensores capacitivos.

Na Tabela 4 estão apresentados os dados de significância do modelo de regressão para os três solos referente ao sensor Eletrodex. É observado que o modelo linear de 1º grau não foi significativo ($P < 0,05$) para o Nitossolo.

Tabela 4 Teste de significância do modelo linear (de primeiro grau) referente ao sensor Eletrodex para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico

Fonte de variação	Quadrado médio	F	Pr>F
Argissolo	0,0203463	11,634	0,0190
erro	0,0017489		
Latossolo	0,045669	13,197	0,0150
erro	0,003460		
Nitossolo	0,0264675	4,6171	0,08438
erro	0,0057325		

Nas Figuras 11, 12 e 13 são apresentados os gráficos com a equação de calibração e coeficiente de determinação (R^2) para o sensor de baixo custo Grove, nos três diferentes solos: Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico e Nitossolo Vermelho eutroférico, respectivamente.

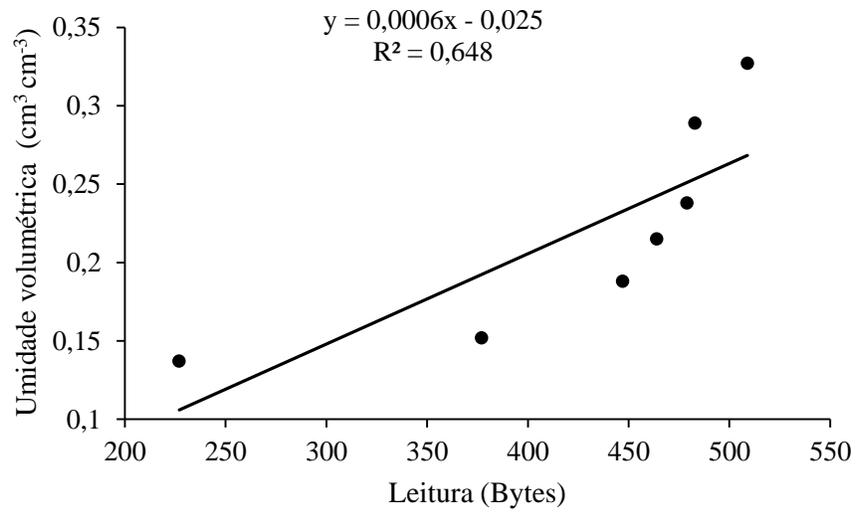


Figura 11 Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Grove para o Argissolo Vermelho distrófico

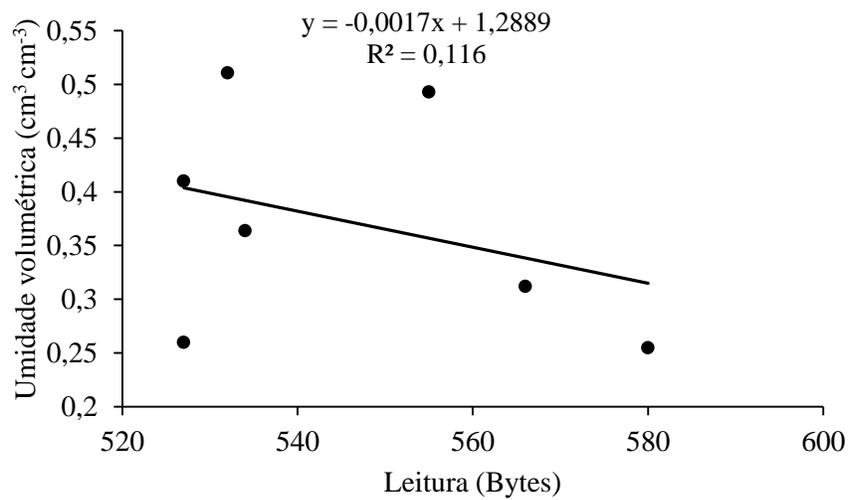


Figura 122 Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Grove para o Latossolo Vermelho distroférrico

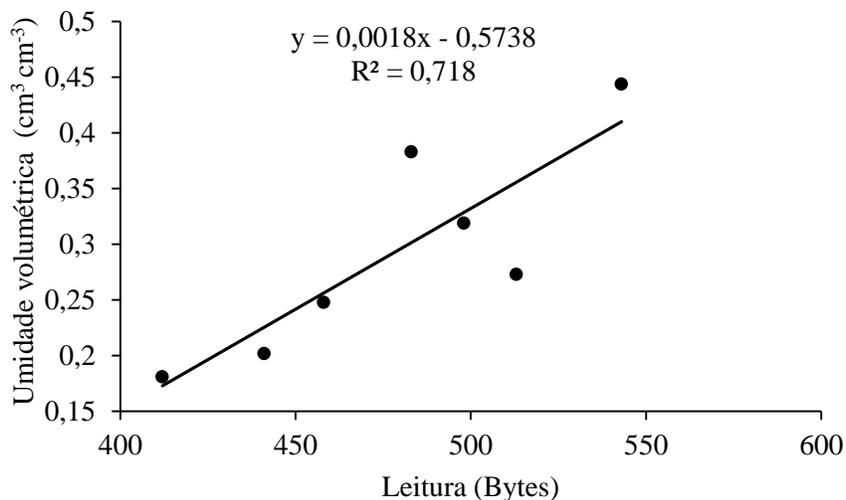


Figura 13 Curva de calibração obtida em laboratório do sensor Grove para o Nitossolo Vermelho eutroférico

Na calibração do sensor Grove (Figuras 11, 12 e 13), houve tendência de aumento dos valores de bytes com o aumento da umidade volumétrica do solo, ou seja, ajuste linear crescente, exceto para o teste realizado com o Latossolo, este apresentou tendência de decréscimo da leitura com o aumento da umidade. Semelhante ao ocorrido com o sensor Eletrodex, os coeficientes de determinação não se apresentaram elevados, foram observados valores de 0,65, 0,72 para o Argissolo e Nitossolo, respectivamente, e apenas 0,11 para o Latossolo.

A curva de calibração apresentou desempenho razoável para o Argissolo e Nitossolo, em que a equação explicou 65% e 72% da variação da umidade do solo, respectivamente. No entanto, a curva de calibração do Latossolo apresentou desempenho bastante baixo, visto que apenas 11% da variação da umidade é explicada pela equação de calibração.

Na Tabela 5 estão apresentados os testes de significância do modelo de regressão de 1º grau para os três solos, referente ao Grove. Nota-se que o modelo linear de 1º grau foi significativo para os três solos ($P < 0,05$).

Tabela 5 Teste de significância do modelo linear (de primeiro grau) referente ao sensor Grove para o Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico

Fonte de variação	Quadrado médio	F	Pr>F
Argissolo	0,0188744	9,2373	0,02877
erro	0,0020433		
Latossolo	0,039403	12,773	0,01598
erro	0,003085		
Nitossolo	0,039403	12,773	0,01598
erro	0,003085		

Ramos et al. (2014) avaliando a acurácia de uma sonda de capacitância (modelo Diviner 2000) realizaram a calibração desse sensor em um Neossolo Quartzarênico Órtico êutrico cultivado com caju no município de Santo Antônio do Leverger, Estado de Mato Grosso. Os autores verificaram que a equação de calibração não apresentou coeficiente de determinação elevado (0,70), ou seja, explicou significativamente 70% da variação da umidade do solo. Já Cruz et al. (2010) desenvolveram e calibraram um sensor capacitivo, em um solo de textura arenosa na região do Baixo Acaraú no Estado do Ceará. Os autores observaram que o sensor apresentou uma resposta à variação do teor de água do solo, com equação de calibração apresentando comportamento potencial, com R^2 de 0,98. Dessa forma, eles concluem que a sonda pode ser utilizada para a estimativa do teor de água do solo de forma adequada.

Mesmo para a calibração do Argissolo e Latossolo referente ao sensor Eletrodex e do Argissolo e Nitossolo para o sensor Grove que apresentaram coeficientes de determinação razoáveis (acima de 0,64), não se apresentam adequadas para a estimativa do teor de água, uma vez que parte considerável da

leitura não é oriunda da variação da umidade volumétrica do solo. A utilização de tais sensores não estima a umidade de forma satisfatória, causando imprecisão na mensuração desta propriedade nos três solos submetidos à calibração. Uma estimativa imprecisa do conteúdo volumétrico de água no solo poderá superestimar ou subestimar a lâmina de irrigação aplicada, o que poderá ocasionar, por exemplo, redução de produtividade da lavoura, problemas fitossanitários nas culturas, lixiviação de nutrientes e aumento no custo da irrigação.

Portanto, mais estudos devem ser realizados a cerca dos três sensores. No que diz respeito ao sensor 10HS, estudos futuros poderão testá-lo em solos semelhantes a fim de organizá-los em grupos de maneira que permitam possuir a mesma equação de calibração. Já para os sensores de baixo custo Eletrodex e Grove, trabalhos podem ser feitos para observar o comportamento de ambos em outros tipos de solos e verificar se seu desempenho possa ser superior ao constado nesse trabalho.

5 CONCLUSÕES

Diante das condições em que o experimento foi conduzido e dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As equações de calibração apresentaram comportamento distinto nos diferentes tipos de solos estudados, necessitando, portanto de calibração específica;

- A equação de calibração recomendada pelo fabricante do sensor 10HS, não se mostrou adequada para a estimativa da umidade em nenhum dos três solos estudados;

- Utilizando-se das equações de calibração obtidas neste estudo com o sensor 10HS, obtém-se de forma bastante satisfatória as umidades do solo, principalmente, para o Latossolo e Nitossolo;

- As equações de calibração dos sensores de baixo custo Eteodex e Grove, não estimaram a umidade volumétrica do solo de forma satisfatória nos intervalos de umidade avaliados, em nenhum dos solos estudados.

REFERÊNCIAS

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**, Belém, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. Water quality for agriculture (Resised). Rome. FAO: Irrigation and Drainage Paper n° 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p.

BARBOSA, M. A. G. **Calibração e uso de sensores FDR para determinação da umidade e salinidade em dois tipos de solos**. 2011. 89 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2011.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensory capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 1940-1946, 2000.

BELL, J. P. **Neutron probe practice**. 3. ed. Wallingford: Institute of Hydrology, 1987. 51 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2008. 625 p.

BLONQUIST, J. M. et al. Improved Dielectric and Electrical Conductivity Anisotropy Measurements Using TDR in Unsaturated Mica. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 3, p. 1097-1104, 2011.

BOHL, H.; ROTH, K. Evaluation of dielectric mixing models to describe the θ (ϵ)-relations. In: **Time Domain Reflectometry in environmental, infra structure, and mining applications**. Evanston: North Western University, 1994, p. 309- 319.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2013, 434 p.

BRULAND, G. L., RICHARDSON, C. J. Spatial variability of soil properties in created, restored, and paired natural wetlands. **Soil Science Society of America Journal** v. 69, n. 1, p. 273-284, 2005.

BÖHME, B.; MATHIAS BECKER, M.; DIEKKRÜGER, B. Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 66, p. 101-111, 2013.

BULLIED, W. J.; VAN ACKER, R. C.; BULLOCK, P. R. Field calibration of an impedance soil water probe for the shallow seedbed across field topography. **Soil Use & Management** v. 23, n. 3, p. 262-268, 2007.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa: Ed. UFV, 2012. 240 p.

CENTENO, A., BAEZA, P., LISSARRAGUE, J. R. Relationship between soil and plant water status in wine grapes under various water deficit regimes. **Horttechnology**, v. 20, n. 13, p. 585-593, 2010.

CICHOTA, R. Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo. 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COBOS, D. **10HS volume of sensitivity**. Application Note 13900-01, Decagon Devices, Pullman, WA, 2008.

COBOS, D. R.; CHAMBERS, C. **Calibrating ECH₂O Soil Moisture Sensors**. Application Note, Decagon Devices, 2010.

CONCEIÇÃO, P.C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n. 5, p.777-788, 2005.

COOLEY, H.; CHRISTIAN-SMITH, J.; GLEICK, P.H. Sustaining California Agriculture in an Uncertain Future. **Pacific Institute**, Oakland, CA, 2009.

COSTA, B. R. S. **Calibração de sensor de capacitância para medida da umidade em solos do semiárido**. 2014. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2014.

COSTA, E. L. da. et al. Irrigação da cebola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 23, n. 218, p. 57-66, 2002.

CRUZ, T. M. L. et al. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010.

CRUZ, J. A. B da. **Desenvolvimento de um sensor de umidade do solo para determinação da frente de molhamento**. 2013. 300 p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2013.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007.

DEAN, R. N. et al. A Capacitive Fringing Field Sensor Design for Moisture Measurement Based on Printed Circuit Board Technology, **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 4, p. 1005-1112, 2012.

DECAGON DEVICES. Operator's manual Version 3.0. 10HS Soil Moisture Sensor, Decagon Devices, Pullman, WA, 2010.

DOBRIYAL, P. et al. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of hidrology**, v. 458-459, p. 101-112, 2012.

DOLEZAL, F. et al. Field and laboratory ad hoc calibrations of virrib and theta probe dielectric sensors for soil moisture measurements. **Soil and Water Research** v. 3 n. 4, p. 199-214, 2008.

DORNELES, J. G. L.; RUIVARO, C. Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH₂O para manejo de irrigação. **Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 8, n. 14, p. 210-218, 2012.

ELNESR, M. N.; ALAZBA, A. A.; EL-FARRAH, M. A. Correcting Inaccurately Recorded Data due to Faulty Calibration of a Capacitance Water Content Probe. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2013, p. 1-10, 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013.

ENGMAN, E. T.; CHAUHAN, N. Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing. **Remote Sensing Environment**, v. 51, n. 1, p. 189-198, 1995.

ERLINGSSON, S. et al. Measurement techniques for water flow. In: DAWSON, A. (Ed.), **Water in Road Structures**. Springer, UK, 2009.

EVETT, S. R. et al. Neutron scattering, capacitance, and TDR soil water content measurements compared on four continents, In: **PROCEEDINGS OF**

THE 17TH WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 59., 2002, Bangkok.
Simposium...Bankok: IISD, v. 14-21, p. 1021-1-1021-10, 2002.

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.

FAO. FAO's Information System on Water and Agriculture- AQUASTAT.
Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data>>. Acesso em: 10 dez. 2014.

FARES, A.; SAFEEQ, M.; JENKINS, D. M. Adjusting temperature and salinity effects on single capacitance sensors. **Pedosphere**, v.19, n. 5, p. 588-596, 2009.

GENSLER, D.; OAD, R.; KINZLI, K. Irrigation system modernization: A case study of the Middle Rio Grande Valley. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 135, n. 2, p. 169-176, 2009.

HANSON, B. R.; PETERS, D. W. Soil types affects accuracy of dielectric moisture sensors. **California Agriculture**, v. 54, n. 3, p. 43-47, 2000.

INOUE, M. et al. Comparison of three dielectric moisture sensors for measurement of water in saline sandy soil. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 2, p. 156-162, 2008.

GEESING, D.; BACHMAIER, M.; SCHMIDHALTER, U. Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, n. 3, p. 289-299, 2004.

GIRALDI, D.; IANNELLI, R. Measurements of water content distribution in vertical subsurface flow constructed wetlands using a capacitance probe: benefits and limitations. **Desalination**, v. 243, p. 182-194, 2009.

GRAVADOS, I. G. et al. Design of a pipeline sensor-based platform for soil water content monitoring. **Biosystems engineering**, v. 113, n. 1, p. 1-10, 2012.

GOMIDE, R. L. Automação de sistemas de irrigação em fruticultura irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 16., 2000, Fortaleza. **Palestra...** Fortaleza: SBF, p. 156-181, 2000.

HANSON, B.R., PETERS, D. Soil type affects accuracy of dielectric moisture sensors. **California Agriculture** v. 54, n. 3, p. 43-47, 2000.

KAISER, D.R. et al. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

KARGAS, G.; SOULIS, K. X. Performance Analysis and Calibration of a New Low-Cost Capacitance Soil Moisture Sensor. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 7, p. 632-641, 2012.

KINZLI, K.; MANANA, N.; OAD, R. A comparison of laboratory and field calibration of a soil moisture capacitance probe for various soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 4, p. 310-321, 2012.

KIZITO, F. et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal Hydrology**, v. 352, n. 3-4, p. 367-378, 2008.

KITIĆ, G.; CRNOJEVIĆ-BENGIN, V. A Sensor for the Measurement of the Moisture of Undisturbed Soil Samples. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1692-1705, 2013.

KODIKARA, J. et al. Soil Moisture Monitoring 40 at the Field Scale Using Neutron Probe. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 3, p. 332-345, 2014.

LEVITT, J. **Response of plants to environmental stress. II: Water radiation, salt and other stress.** New York: Academic Press, 1980. 606 p.

LINMAO, Y. et al. FDR Soil Moisture Sensor for Environmental Testing and Evaluation. **Physics Procedia**, v. 25, p.1523-1527, 2012.

MARKEVICIUS, V. et al. The soil moisture content determination using interdigital sensor. **Elektronika ir Elektrotechnika**, v. 18, n. 10, p. 25-28, 2012.

MINET, J. et al. Generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properties determination. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 1063-1072, 2010.

MIRANDA, F.R. de. et al. Calibração do sensor dielétrico ECH₂O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2007.

MITTELBAACH, H.; LEHNER, I.; SENEVIRATNE, S.I. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. **Journal of Hydrology**. v. 430, p. 39-49, 2012.

MUÑOZ-CARPENA, R. **Field Devices For Monitoring Soil Water Content.** Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida. Publication #BUL343, 2015. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/ae266>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

MUÑOZ-CARPENA, R., SHUKLA, S., MORGAN, K. Field Devices for Monitoring Soil Water Content. **Extension Bulletin**, v. 343. Dept. of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, 2004.

MORTL, A.; MUÑOZ-CARPENA, R.; KAPLAN, D.; LI, Y. Calibration of a combined dielectric probe for soil moisture and porewater salinity measurement

in organic and mineral coastal wetland soils. **Geoderma**, v.161, n. 1-2, p. 50-62, 2011.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; MORAES, J. A. P. V.; BURITY, H. A. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleira submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 75-87, 2001.

RAMOS, F. T.; PIVETTA, F.; MATOS, V. A. T.; SEIXAS, G. B.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um neossolo quartzarênico cultivado com caju. **Bionscience Journal**, v. 30, n. 6, p. 1631-1641, 2014.

R DEVELOPMENT CORE TEAM.**R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2013. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 out. 2015.

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

REZAEI, M. et al. A new 1.4-GHz soil moisture sensor. **Measurement**, v. 45, n. 7, p. 1723-1728, 2012.

ROQUE, W. **Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo**. 2008. 45 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

ROSEGRANT, M.; RINGLER, C.; ZHU, T. Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 205-222, 2009.

SANTANA, J. et al. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1123-1130, 2012.

SILVA, B. M. et al. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012.

SEYFRIED, M. S; MURDOCK, M. D. Measurement of Soil Water Content with a 50-MHz Soil Dielectric Sensor. **Soil Science Society of America**, v. 68, n. 2, p. 394-403, 2004.

SILVA, C. R. da; ANDRADE JÚNIOR, S. de A.; SOUZA, C. F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. In: SOUZA, C. F.; VARALLO, A. C. T.; LOPES, L. N.; SANTORO, B. L. (Org.). **Aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Taubaté: Universidade de Taubaté - UNITAU, 2008, v.1, p. 25-45.

SILVA, I. O. Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento da umidade do solo. 2005. 86 p. Dissertação (Agronomia) - Universidade federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SILVA JUNIOR, J. J. et al. Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em Latossolo vermelho distroférico. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 743-755, 2013.

SONCELA, R. et al. Construction and calibration of TDR probes for volumetric water content estimation in a Distroferric Red Latosol. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 5, p. 919-928, 2013.

SPELMAN, D.; KINZIL, K-D.; KUNBERGER, T. Calibration of the 10HS Soil Moisture Sensor for Southwest Florida Agricultural Soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 12, p. 965-971, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.

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**, v. 29, n. 2, p. 161-168, 2005.

TERZIS, A. et al. Wireless sensor networks for soil science. **International Journal of Sensor Networks**, v. 7, n. 1-2, p. 53-70, 2010.

THOMPSON, R.B. et al. Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. **Irrigation Science**, v. 24, n. 3, p. 185-202, 2006.

THOMPSON, R. B. et al. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 88, n. 1-3, p. 147-158, 2007b.

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**, v. 64, n. 5, p. 1549-1553, 2000.

VELLIDIS, G. et al. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 44-50, 2008.

VENTURA, F. et al. Soil Moisture Measurements: Comparison of Instrumentation Performances. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 136, n. 2, p. 81-89, 2010.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M. H. F.; VILAS BOAS, M. A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, v. 9, n. 1, p. 82-88, 2004.

VISCONTI, F. et al. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. **Agricultural Water Management**, v. 132, p. 111-119, 2014.

WALDSCHMIDT, D. R. **Desenvolvimento de um medidor de fração de água utilizando tecnologia de microondas**. 2008. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R.; KALMA, J. D. In situ measurement of soil moisture: A comparison of techniques. **Journal of Hydrologia**, v. 293, n. 1, p. 85-99, 2004.

WANG, X. et al. Temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture for a transect in artificial revegetation desert area, China. **Journal of Hydrology**, v. 507, p. 100-109, 2013.

WESTERN, W. A., GRAYSON, R. B., BLÖSCHL, G. Scaling of soil moisture: a hydrologic perspective. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 30, p. 149-180, 2002.