



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
CURSO DE AGRONOMIA

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO

CÁSSIO LOPES DE OLIVEIRA

Garanhuns - Pernambuco

Agosto de 2018

CÁSSIO LOPES DE OLIVEIRA

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia da Unidade Acadêmica de Garanhuns da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências da Disciplina Estágio Supervisionado Obrigatório.

Orientador: José Romualdo de Sousa Lima

Co-orientador: Mário Sansuke Maranhão Watanabe

Garanhuns - Pernambuco
Agosto de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Ariano Suassuna, Garanhuns-PE, Brasil

O48c Oliveira, Cássio Lopes de

Calibração de sensores de umidade do solo de baixo custo
/ Cássio Lopes de Oliveira. - 2018.

50 f. : il.

Orientador(a): José Romualdo de Sousa Lima.

Coorientador(a): Mário Sansuke Maranhão Watanabe.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de
Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Agronomia, Garanhuns, BR - PE, 2018.

Inclui referências

1. Solos - Umidade 2. Arduino (Controlador programável) I. Lima,
José Romualdo de Sousa, orient. II. Watanabe, Mário Sansuke
Maranhão III. Título

CDD 631.4

CÁSSIO LOPES DE OLIVEIRA

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO

Aprovada em:

Prof. Dr. José Romualdo de Sousa Lima
(Doutor UFRPE/UAG)

Prof. Dr. Anderson Santos Silva
(Doutor UFRPE/UAG)

Prof. Dr. Marcelo Metri Corrêa
(Doutor UFRPE/UAG)

DEDICATÓRIA

À minha Tia Cássia, pessoa com quem amo partilhar a vida.
Dedico esta, bem como todas as minhas demais
conquistas, aos meus amados avós João e Raimunda (In memoriam)
que falta vocês me fazem!
À minha filha Rebeca meu melhor e maior presente...

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse.

A meus avós João e Raimunda (in memorian), por ter me ensinado o valor de se fazer as coisas da melhor maneira possível e por me olhar de seu lugar, aos dois espero honrar a cada dia todo amor e confiança que depositaram em mim. Muito obrigado.

A minha titia Cássia que é muito mais que uma tia, agradeço por ser minha mãe, pai, amiga e conselheira, meu ombro amigo e consolo de todas as horas, agradeço em especial por todo o seu esforço e contribuição para me ver vencer não só essa batalha mais por todas ao longo da vida.

Ao meu Tio Eduardo (in memorian), que imagino sua vibração se estivesse aqui, por mais essa vitória em minha vida, e por dizer sempre para eu não ter medo e seguir sempre em frente.

A todos meus familiares que ao longo de todos esses anos tanto me ajudaram e me moldaram não apenas nessa jornada universitária mais durante toda e para toda a vida.

Aos Professores e orientadores, José Romualdo de Souza Lima e Mário Sansuke Maranhão Watanabe, por todo o apoio, orientações, ensinamentos, oportunidade, confiança e dedicação, meu muito obrigado.

A todos os docentes, técnicos e terceirizados que fazem a UFRPE/UAG, com todos tive a oportunidade de me relacionar durante esse período de formação, agradeço por todo o conhecimento que através de seus ensinamentos eu pude absorver.

Agradeço a todos as amizades que conquistei durante essa jornada, amigos de outras turmas e em especial a minha turma (Agronomia 2013.2) diga-se de passagem, a melhor turma que já conheci nessa universidade.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
SUMÁRIO	VI
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1 – INTRODUÇÃO	13
2 – OBJETIVOS	16
2.1 – Objetivo Geral.....	16
2.2 – Objetivos Específicos.....	16
3 – REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 – Umidade do solo.....	17
3.2 – Métodos de medição da umidade de solo.....	18
3.2.1 - Método Direto ou Gravimétrico (padrão).....	18
3.2.2 – Métodos Indiretos.....	19
3.2.2.1 – Sonda de Nêutrons.....	20
3.2.2.2 – Sensores Resistivos.....	21
3.2.2.3 – Sondas de Capacitância ou sensores TDR.....	22
3.3 – Calibração de Sensores.....	23
3.4 – Sistema de baixo custo para aquisição de dados.....	24
4 – MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 – Escolha e Coleta dos Solos.....	26
4.2 – Análise granulométrica e determinação da densidade do solo.....	26
4.3 – Determinação da umidade na capacidade de campo (UCC) e umidade no ponto de murcha permanente (UPMP).....	27
4.4 – Preparo das amostras para obtenção das leituras.....	28
4.5 – Montagem dos sensores e do sistema de aquisição de dados.....	28
4.6 – Ensaio de Calibração.....	31
4.7 – Tabulação e Tratamento dos dados.....	32
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 – Calibração Solo Textura Arenosa.....	34
5.3 - Calibração Solo Textura Média.....	40

5.4 - Calibração Solo Textura Média com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade.....	43
6 – CONCLUSÕES.....	47
7 – REFERÊNCIAS.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Atributos físico-hídricos referentes aos solos Neossolo, Latossolo , Latossolo hidrofóbico e Vertissolo.....	33
Tabela 2: Parâmetros da curva de ajuste do solo arenoso.....	36
Tabela 3: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura arenosa.....	36
Tabela 4: Parâmetros da curva de ajuste do solo argiloso.....	39
Tabela 5: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura argilosa.....	39
Tabela 6: Parâmetros da curva de ajuste do solo textura média.....	41
Tabela 7: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura média.....	42
Tabela 8: parâmetros da curva de ajuste do solo de textura média com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade.....	45
Tabela 9: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura média com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema Ilustrado de uma sonda de nêutrons.....	21
Figura 2: Sensor resistivo de umidade do solo, modelo HL-69.....	22
Figura 3: Sensor TDR modelo CS615.....	23
Figura 4: Amostras de solo sobre placa porosa.....	27
Figura 5: Pesagem das amostras de solo em Becker de 50ml.....	28
Figura 6: Sensor e Micro Controlador.....	29
Figura 7: Sketch utilizado no micro controlador Arduino UNO.....	30
Figura 8: Sensores HL-69 inseridos nas amostras de solo.....	32
Figura 9: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura arenosa (Neossolo Regolítico).....	34
Figura 10: Curva média dos seis sensores em solo de textura arenosa (Neossolo Regolítico).....	35
Figura 11: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura argilosa (Vertissolo). 38	
Figura 12: Curva média dos seis sensores em solo de textura argilosa (Vertissolo).....	38
Figura 13: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura média (Latossolo)....	40
Figura 14: Curva média em solo de textura média (Latossolo).....	41
Figura 16: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura média Latossolo com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade.....	44
Figura 17: Curva média em solo de textura média (Latossolo) com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade.....	44

OLIVEIRA, Cassio Lopes. **Calibração de sensores de umidade do solo de baixo custo**. 2018. 50f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, Pernambuco, Brasil*.

RESUMO

O monitoramento da umidade do solo é de extrema importância para o manejo correto das atividades agrícolas, a exemplo da irrigação. Existem diversos métodos para realizar esse monitoramento: os métodos diretos e os métodos indiretos. Esses métodos apresentam vantagens e desvantagens com relação uns aos outros, por exemplo, o método direto (gravimétrico), ou método padrão, tem a vantagem de ser um método barato, no entanto possui a desvantagem de ser um método destrutivo e lento na aquisição dos dados. Já os métodos indiretos, os quais possibilitam as leituras instantâneas e precisas, possuem como desvantagem o alto custo de aquisição desses equipamentos. Dessa forma surge a necessidade de um sistema de monitoramento de umidade do solo utilizando sensores e equipamentos de baixo custo, que possam ser precisos e com leituras em curto espaço de tempo. Assim sendo, o presente trabalho teve o objetivo de calibrar sensores de umidade do solo de baixo custo em solos de diferentes texturas. Para isso, amostras de solo foram coletadas e submetidas à análise granulométrica. Para que fossem obtidas amostras com diferentes texturas. Também foi utilizado um solo com elevado teor de matéria orgânica, e com a presença do caráter hidrofóbico, para avaliar o efeito da hidrofobicidade no funcionamento dos sensores. Após, foram realizados ensaios de calibração de 06 unidades de sensores de baixo custo modelo HL-69. Os ensaios de calibração consistiram em se determinar a umidade do solo de forma direta (método gravimétrico) e ao mesmo tempo se realizar a leitura dos sensores para diferentes teores de água no solo. Após os ensaios de calibração, os dados foram tabulados e tratados em planilhas eletrônicas, onde a partir das médias das leituras dos 06 sensores foram obtidas equações de ajustes para cada tipo de solo. Calculou-se também os erros percentuais de cada sensor com relação à média dos mesmos para cada textura. Observou-se que, independentemente da textura do solo, os sensores apresentaram uma estabilização da leitura quando submetidos a umidade acima da capacidade de campo de cada solo. Notou-se, também, que para solos de mesma textura e no mesmo nível de umidade, cada sensor apresentava uma leitura diferente, indicando a necessidade de calibração individual dos mesmos. Em relação ao solo com elevado teor de matéria orgânica (hidrofóbico), verificou-se que as leituras dos sensores foram de forma diferente dos solos sem essa característica. Assim, conclui-se que os sensores de baixo custo apresentam boa sensibilidade dentro da faixa de água disponível do solo, podendo ser utilizados no manejo de irrigação. No entanto, necessitam de calibrações específicas para cada tipo de solo e também para cada sensor, essa necessidade aumenta ainda mais quando se tratar de solos com elevados teores de matéria orgânica.

Palavras-chave: Conteúdo de água no solo, Arduino®, Textura do Solo.

*Comitê Orientador: José Romualdo de Sousa Lima (Orientador), Mário Sansuke Maranhão Watanabe (Co-orientador)

OLIVEIRA, Cassio Lopes. **Calibration of low cost soil moisture sensors**. 2018. 50f. Monograph (Graduation in Agronomy) – Federal Rural University of Pernambuco, Garanhuns, Pernambuco, Brasil*.

ABSTRACT

The monitoring of soil moisture is of extreme importance for the correct management of agricultural activities, such as irrigation. There are several methods to perform this monitoring: direct methods and indirect methods. These methods have advantages and disadvantages with respect to each other, for example, the direct (gravimetric) method, or standard method has the advantage of being a cheap method, however it has the disadvantage of being a destructive and slow method in the acquisition of the data. Indirect methods, which enable instantaneous and accurate readings, have the disadvantage of the high cost of purchasing such equipment. In this way, there is a need for a soil moisture monitoring system using low cost sensors and equipment, which can be accurate and read in a short period of time. Therefore, the present work had the objective of calibrating soil moisture sensors of low cost in soils of different textures. For this, soil samples were collected and submitted to particle size analysis. In order to obtain samples with different textures. A soil with high organic matter content and hydrophobic character were also used to evaluate the effect of hydrophobicity on the functioning of the sensors. After that, calibration tests were carried out on 06 units of low cost sensors model HL-69. The calibration tests consisted of determining the soil moisture directly (gravimetric method) and at the same time the sensors were read for different soil water contents. After the calibration tests, the data were tabulated and processed in electronic spreadsheets, where from the means of the readings of the 06 sensors, equations of adjustments were obtained for each type of soil. The percentage errors of each sensor were also calculated with respect to the mean of each sensor for each texture. It was observed that, independently of soil texture, the sensors presented a stabilization of the reading when submitted to humidity above the field capacity of each soil. It was also noted that for soils of the same texture and at the same moisture level, each sensor presented a different reading, indicating the need for individual calibration of the same. In relation to soil with a high content of organic matter (hydrophobic), it was verified that the sensor readings were different from the soils without this characteristic. Thus, it is concluded that low-cost sensors have good sensitivity within the range of available soil water, and can be used for irrigation management. However, they require specific calibrations for each type of soil and also for each sensor, this need increases even more when dealing with soils with high levels of organic matter.

Keywords: Soil water content, Arduino®, Soil texture.

*Comitê Orientador: José Romualdo de Sousa Lima (Orientador), Mário Sansuke Maranhão Watanabe (Co-orientador)

1 – INTRODUÇÃO

A humanidade vem buscando encontrar medidas mitigadoras contra os impactos ambientais decorrentes do acelerado desenvolvimento dos processos de produção das últimas décadas. Para isso os processos de produção estão sofrendo sérias reformulações visando a sustentabilidade ambiental e a manutenção do desenvolvimento humano. Neste contexto, a agricultura mundial busca cada vez mais utilizar alternativas de produção embasadas em ferramentas computacionais e de gerenciamento especializado.

Segundo a Organização das Nações Unidas (2017), em um mundo onde as demandas de água doce estão crescendo continuamente e os recursos hídricos limitados são cada vez mais desgastados por excesso de captação, poluição e mudanças climáticas, negligenciar as oportunidades decorrentes da gestão melhorada de recursos hídricos como a água é nada menos que impensável.

Com isso, o conhecimento da umidade do solo é de grande importância desde o ponto de vista ambiental até o econômico, pois, proporciona um aumento na eficiência da irrigação, contribui na redução de gastos com recursos hídricos e energia. Assim, torna-se indispensável ao sucesso de uma agricultura sustentável monitorar a umidade do solo. Segundo (KITIĆ; CRNOJEVIĆ-BENGIN, 2013) o conhecimento e monitoramento da umidade do 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 além de se empregar os recursos hídricos de forma racional, nesse mesmo raciocínio (SYPERRECK et al., 2008) dizem que em função da escassez de recursos hídricos para o homem e para atividades agrícolas, torna-se cada vez mais necessário um planejamento mais eficaz para o consumo da água, com desenvolvimento de metodologias que permitam estimar volumes mais exatos para produção agrícola. Nesse mesmo sentido (WUTKE et al., 2000) destacam a importância da adoção de técnicas racionais de manejo conservacionista do solo e da água, de tal forma que se possa, de maneira econômica manter ao longo do tempo esses recursos com quantidade e qualidade suficientes para a manutenção de níveis satisfatórios de produtividade.

Segundo Frizzone (2017), há diversos métodos para a determinação do conteúdo de água do solo, esses vêm evoluindo ao longo do tempo, adequando-se aos avanços da

tecnologia. De maneira geral, os métodos podem ser agrupados em duas categorias, sendo chamados métodos diretos e métodos indiretos. Dentre os diretos está o método gravimétrico, considerado como padrão, que, no entanto, é trabalhoso e requer tempo de reposta de pelo menos 24 horas para obtenção do resultado. Desse modo tal método não possibilita a repetibilidade. Outros métodos são os chamados indiretos, que estimam a quantidade de água a partir de outras propriedades do solo que podem ser associadas à umidade em determinados momentos, dos quais destacam-se os tensiométricos, os sensores de resistência elétrica, os sensores de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e de frequência (sonda de capacitância ou FDR), assim como também os de reflexão e/ou emissão de radiação (LIMA et al., 2012). De acordo (CARVALHO E OLIVEIRA, 2012) tais métodos indiretos baseiam-se em medidas da resistência do solo à passagem de uma corrente elétrica, da constante dielétrica do solo, da tensão da água no solo e da moderação de nêutrons.

A seleção do equipamento a ser utilizado deverá considerar o objetivo, vantagens e limitações, necessidade de operador, custo, facilidade de operação dentre outros aspectos. Atualmente, uma das principais limitações dos equipamentos anteriormente descritos está sendo o custo para aquisição, o qual depende de importação por não haver disponibilidade direta no mercado nacional, assim como dito por Lima et al. (2006) sobre as desvantagens e/ou limitações do método TDR que apesar de possuir vantagem com relação a sonda de nêutrons isso pelo fato desse método não utilizar fonte nuclear o mesmo método (TDR) tem como desvantagem o alto custo de aquisição, a necessidade de calibração para diferentes tipos de solo e, dependendo do tipo de solo, não pode ser instalado em grandes profundidades. Também, alguns autores têm verificado limitações quanto ao uso da equação para a medida da umidade com técnicas eletromagnéticas para solos com altos teores de matéria orgânica, solos expansivos, solos salinos e solos contendo minerais magnéticos como a magnetita, conforme revisão feita por Vaz (2008). Assim, para melhor acurácia, o equipamento deve ser calibrado para a textura do solo em estudo, seja em condições de laboratório ou em campo. Evett et al. (2006) propuseram que a calibração de sensores capacitivos e resistivos sejam separadas por horizonte do solo, uma vez que a permissividade aparente é influenciada por teores de matéria orgânica e argila (VELDKAMP; O'BRIEN, 2000; SÁ et al., 2008; KAISER et al., 2010), óxidos e hidróxidos de ferro (Prevedello et al., 2007; Kaiser et al., 2010), condutividade elétrica, temperatura (TOMASELLI & BACCHI, 2001; EVETT

et al., 2006) e densidade do solo (HUANG et al., 2004); atributos que podem apresentar variação no perfil do solo.

Ainda assim, os métodos indiretos apresentam vantagens em relação ao método padrão por proporcionarem respostas rápidas, medições não destrutivas e precisão aceitável (STACHER; KOENIGER; SCHUHMANN, 2009). Por isso, os métodos indiretos estão ganhando espaço no Brasil e no mundo.

Atualmente os mais variados fabricantes têm disponibilizado uma grande quantidade de equipamentos/sensores e softwares capazes de atender com qualidade e auxiliar na solução dos mais diversos problemas do campo, porém, ainda nos deparamos com alguns problemas, tais como: custo elevado desses equipamentos, não interoperabilidade e exigência de conhecimento técnico do usuário.

Diante dessa problemática surge um sistema de código aberto disponível no mercado nacional e acessível a um custo relativamente baixo, esse sistema é o chamado ARDUINO, um microcontrolador programável para processar entradas e saídas a partir de sensores e atuadores aos quais se conecta. É uma plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e programa (MCROBERTS, 2011). Existem várias placas Arduino, tais como: arduino UNO, arduino Mega, o arduino ADK (MCROBERTS, 2011). O que vai diferenciá-los é o micro controlador e o número de portas seriais e digitais que são disponibilizadas.

2 – OBJETIVOS

2.1 – Objetivo Geral

Calibrar um sistema de monitoramento de umidade do solo que seja preciso e de baixo custo.

2.2 – Objetivos Específicos

Montar e programar um sistema de aquisição e monitoramento de dados em plataforma Arduino®.

Calibrar sensores de umidade do solo do tipo Arduino®, em solos de diferentes texturas.

Analisar a influência dos teores de argila e matéria orgânica na calibração dos sensores de umidade do solo.

3 – REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 – Umidade do solo

O solo, reservatório de água para as plantas, é afetado pelo seu manejo e pelas práticas culturais, com consequente alteração da dinâmica e retenção de água nos poros. Os fatores que influenciam a disponibilidade de água nas culturas são: a estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas; a textura, o tipo e quantidade de argila e o teor de matéria orgânica (KLEIN; LIBARDI, 2000). A textura do solo, principalmente o teor de argila, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção (REICHARDT, 1987). Dentre as características hídricas, que são utilizados em projetos de irrigação e drenagem, experimentos em casa-de-vegetação e na avaliação do efeito do manejo do solo, está a quantidade de água disponível do solo (AD) (MILLAR, 1984; COSTA; COELHO, 1989). A AD do solo é definida como sendo a diferença entre o teor de água no limite superior de umidade ou capacidade de campo (UCC) e o teor de água no limite inferior de umidade ou ponto de murchamento permanente (UPMP) (REICHARDT, 1985). Este atributo é afetado pelas características do solo, como o teor de matéria orgânica, microporosidade, percentagem e tipos de minerais encontrados na fração argila (ELRICK; TANNER, 1955; SALTER; WILLIAMS, 1965).

Conhecer a dinâmica de água no solo torna-se cada vez mais necessária, uma vez que está intimamente ligada às propriedades do sistema solo-água-planta (REICHARDT; TIMM, 2004). Neste aspecto, técnicas que envolvam a utilização da instrumentação agrônômica, com vistas em determinar a umidade do solo, são de grande importância para a pesquisa científica. Rossato et al., (2005) destacam o fato de que a avaliação da condição da umidade do solo fornece informações importantes para diversos fins, tais como estudo de troca entre o solo e a atmosfera e, principalmente, nas atividades agrícolas, como, por exemplo, para a estimativa dos efeitos das secas e enchentes sobre a queda do rendimento das culturas.

A água é responsável pelas maiores flutuações na produção das culturas (GUBIANI et al., 2005). Assim, é preciso priorizar práticas que proporcionem um melhor aproveitamento da água (REICHERT et al., 2005). O conhecimento do

armazenamento de água e sua relação com os atributos do solo são de fundamental importância para o eficiente manejo da água, do solo e das plantas (SILVA, 2003).

3.2 – Métodos de medição da umidade de solo

Alguns parâmetros como precisão, tempo de leitura e custo para medição devem ser considerados na escolha do método que vai ser utilizado (MENDES, 2006). Podemos classificar os métodos de medição de umidade do solo em duas categorias: diretos ou indiretos. O método direto consiste em obter uma amostra do solo, retirar toda a água contida nesta amostra e quantificar o volume de água retirado. O método indireto utiliza propriedades físicas (capacitância, resistência elétrica, pressão e etc.) que variam de acordo com a quantidade de água presente no solo (MENDES, 2006). Costa et al. (2013) afirma que os métodos indiretos são amplamente utilizados em pesquisas e sistemas de agricultura de precisão para monitoramento do teor de água no solo devido à praticidade, rapidez e a possibilidade de repetir medições em uma determinada área do solo várias vezes em um curto espaço de tempo a fim de reduzir a margem de erro das leituras. Segundo (SILVA; ANDRADE JÚNIOR; SOUZA, 2008) para aumentar o nível de precisão dos métodos indiretos é necessário realizar calibrações para adaptação ao ambiente no qual o dispositivo de medição será implantado.

3.2.1 - Método Direto ou 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. 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). Embora apresente boa precisão, é um método de determinação que demanda bastante tempo (de 24 a 48 h). Outro aspecto que o torna desvantajoso em campo 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. A umidade gravimétrica é obtida por:

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

Onde:

U a umidade do solo, em base peso ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),

mu a massa de solo úmido (g) e

ms a massa de solo seco (g).

3.2.2 – Métodos Indiretos

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; ANDRADE JÚNIOR; SOUZA, 2008). Costa; Santos; Bassoi, (2014) ressaltam 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. Segundo Silva et. al. (2008) para aumentar o nível de precisão dos métodos indiretos é necessário realizar calibrações para adaptação ao ambiente no qual o dispositivo de medição será implantado.

Os principais métodos indiretos baseiam-se em medidas como a sonda de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica e a constante dielétrica do solo ou a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Estas são características do solo que variam com a sua umidade (CALBO; SILVA, 2005; TEIXEIRA; MORAES; SIMONETE 2005).

3.2.2.1 – Sonda de Nêutrons

A sonda de nêutrons (Figura1) consiste essencialmente de duas partes: a placa com a sonda que é inserida no solo e o sistema de contagem eletrônica. 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 dos átomos de hidrogênio presentes 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. Estes métodos que utilizam radiação possibilitam medidas em diferentes profundidades do solo, sendo que para medições muito próximas a superfície do solo, devido à esfera de influência da sonda, não oferece precisão.

Este método têm a vantagem na rapidez das medidas, cerca de um minuto, e podem ser repetidas várias vezes sem alterar a estrutura do solo. Porém apresentam algumas desvantagens como o elevado custo atual dos equipamentos e erros nos resultados para solos ricos em outras fontes de hidrogênio que não a água (matéria orgânica e outros elementos como cloro, ferro e boro, etc). Outra desvantagem desse método é devido à fonte radioativa, cuja utilização necessita do conhecimento de leis e normas que regulamentam e fiscalizam o uso desses materiais. (TEIXEIRA; MORAES; SIMONETE, 2005), em seu trabalho Lima et al. (2006) destacam o fato de que a sonda de nêutrons apesar de ser um método preciso quando comparado com outro método, o mesmo apresenta algumas limitações, como por exemplo a existência de regras de licenciamento e forte exigência de treinamento de usuários isso ligado ao fato de se tratar de um equipamento que utiliza fonte de radiação, segundo os autores toda essa burocracia fazem com que o método da moderação de nêutrons (MN) ou sonda de nêutrons permaneça caro e difícil de se usar em algumas situações, particularmente, em monitoramento não vigiado.

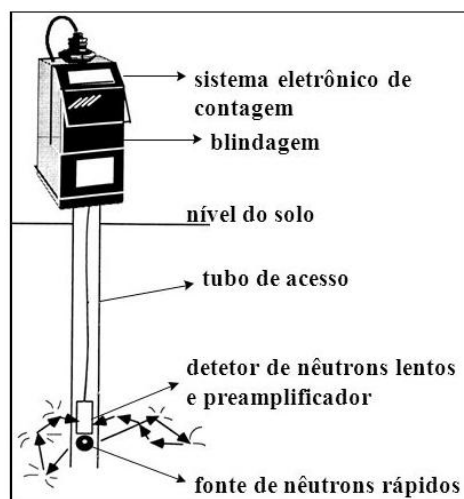


Figura 1: Sistema ilustrado de uma sonda de nêutrons
(Fonte: Reichardt e Timm (Solo, planta e atmosfera))

3.2.2.2 – Sensores Resistivos

O sensor resistivo de umidade do solo funciona monitorando a variação da resistência elétrica entre dois eletrodos embutidos no solo. A resistência elétrica medida pelo sensor é inversamente proporcional à umidade do solo (MENDES, 2006), ou seja, quanto mais água presente no solo menor será a resistência elétrica medida. Uma das principais vantagens gerais da utilização do sensor resistivo de umidade do solo são o baixo custo de aquisição, a simples operação do sensor e a alta disponibilidade no mercado (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005).

A Figura 2, apresenta o HL-69, fabricado pela Shenzhen Guangfasheng Technology Co., Ltd., um modelo de sensor resistivo de umidade do solo composto separadamente por uma sonda de detecção de umidade do solo e seu módulo para comunicação com o microcontrolador através de saída analógica de tensão, a separação da sonda de detecção do módulo de comunicação vem como uma vantagem, permitindo assim isolar o módulo de comunicação que não é a prova de água. Em lojas internacionais, possui valores entre \$0,50 e \$3,00 dólares. Já no Brasil, seu custo médio fica entre R\$11,00 e R\$16,00.

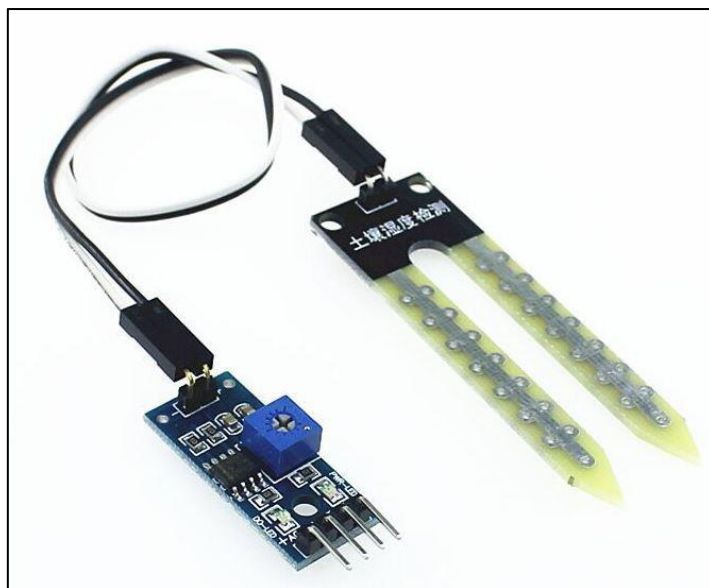


Figura 2: Sensor resistivo de umidade do solo, modelo HL-69
(Fonte: rivago.tk)

3.2.2.3 – Sondas de Capacitância ou sensores TDR

Os sensores do tipo TDR (Figura 3) 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). Esse método baseia-se no fato de que a constante dielétrica dos minerais no solo não excede 12, enquanto que a constante dielétrica da água pura é de aproximadamente 81. Por essa razão a variação da constante dielétrica no meio solo-água-ar estará diretamente associada ao conteúdo de água presente no solo (YODER et al., 1998). 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).

Para medidas de umidade do solo em laboratório e em campo, a utilização da TDR possui algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, possibilidade de multiplicação de leituras, repetição sem destruição da amostra de solo e pela segurança, isso pelo fato de não utilizar fonte de radiação (Topp et al., 1980; Coelho & Or, 1996). Lima et al (2006) compararam o funcionamento de dois métodos

indiretos, sendo eles o método da sonda de nêutrons e o método de sensores TDR, e concluíram que ambos se mostram precisos na estimativa de umidade do solo. Nesse caso pode-se dizer que o método TDR possui uma vantagem com relação ao método de sonda de nêutrons pelo fato de não expor o operador a fonte radioativa, porém apesar de todas as vantagens, essa técnica possui certos inconvenientes. Muñoz-Carpena (2015), destacam como desvantagem desse método o seu custo relativamente alto, devido à complexidade da eletrônica envolvida.

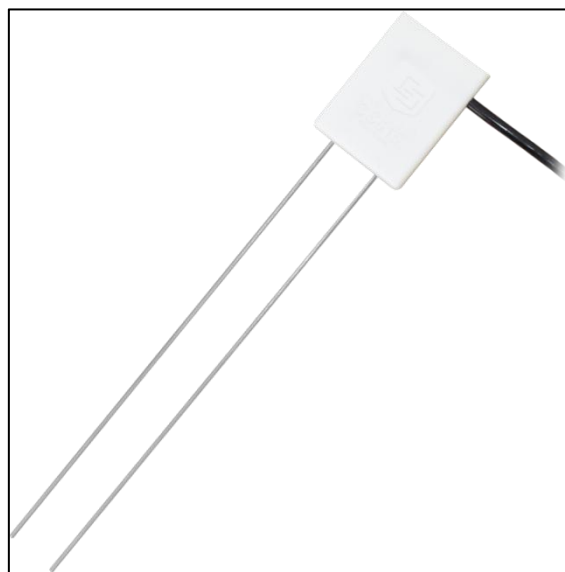


Figura 3: Sensor TDR modelo CS615
(Fonte: campbellsci.com)

3.3 – Calibração de Sensores

Gomes et al. (2013) mencionam que a maioria das sondas dielétricas comercialmente disponíveis de fabricantes especializados utilizam equações de calibração previamente estabelecidas por seus fabricantes. No entanto, ainda segundo Gomes et al. (2013), 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. De acordo Tommaselli & Bacchi, (2001) vários autores tem determinado curva de calibração de sondas TDR, no entanto, para que se tenha informações precisas, é necessário a calibração do equipamento para cada tipo de solo.

Os sensores eletrônicos podem ser muito precisos, porém, o seu erro está ligado à qualidade do equipamento e/ ou sua condição de calibração inicial. Uma vez calibrado

na condição de campo e de forma correta, um sensor de umidade passa a fazer leituras reais dos teores de água no solo (SILVA et al., 2012; GOMES et al., 2013).

De acordo com Kinzli, Manana e Oad (2012), a calibração de sensores realizada em laboratório e em campo pode 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).

3.4 – Sistema de baixo custo para aquisição de dados

Com o desenvolvimento tecnológico, tornou-se possível a criação de estações meteorológicas automáticas (Automatic Weather Station – AWS) que dispensam a interferência humana nas medições excedendo em termos de precisão e taxa de amostragem as antigas estações administradas pelo INMET. As estações automáticas caracterizam a melhor opção para medições meteorológicas, com bom desempenho, praticidade e confiabilidade; mas possuem um custo muito elevado. Este alto preço desencoraja o uso dessas estações meteorológicas para diversos fins. De acordo Kanda et al., (2011), percebe-se também a dificuldade do uso desses equipamentos encontrada por profissionais como agricultores, pescadores ou maricultores, por exemplo, que não receberiam o custo benefício desses equipamentos, embora os dados meteorológicos lhes sejam essenciais.

Como alternativa de um sistema de baixo custo para aquisição de dados temos a plataforma Arduino, uma plataforma de computação física de fonte aberta para criação de protótipos de eletrônica baseada no conceito de software e hardware livres, e de fácil utilização, projetada com um microcontrolador Atmel AVR de placa única, com suporte de entrada e saída embutido e uma linguagem de programação padrão (EVANS, 2011).

Segundo Banzi, (2012), o diferencial do Arduino em relação a outras plataformas presentes no mercado está no fato do mesmo possuir um hardware barato, ser também um hardware e software de código aberto (open-source) e tratar-se de um ambiente multi plataforma, ou seja, que pode ser executado em Windows, Macintosh e Linux.

A atual versão da placa Arduino é conhecida como Arduino Uno. Esta placa baseia-se no microcontrolador ATmega328. Tem quatorze pinos digitais de entrada e

saída, seis dos quais podem ser usados como saídas de modulação por largura de pulso (PWM), juntamente com mais seis pinos de entrada analógica (SCHMIDT, 2011).

4 – MATERIAL E MÉTODOS

O experimento de calibração foi realizado no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE/UAG), localizada no agreste do estado de Pernambuco. Foram utilizados no experimento três diferentes classes de solos: Neossolo Regolítico, Latossolo Amarelo e Vertissolo, ambos coletados na região do agreste pernambucano.

4.1 – Escolha e Coleta dos Solos

As três classes de solo foram escolhidas por apresentarem textura diferentes (Neossolo regolítico, Latossolo Amarelo e Vertissolo). Com a utilização dessas três classes de solo, buscou-se avaliar se ocorre variação nas leituras dos sensores quando o mesmo é instalado em solos de diferentes texturas. Além disso, utilizou-se um Latossolo Amarelo húmico de textura média, com alto teor de matéria orgânica e hidrofóbico, de acordo com Moura (2018) ainda segundo o autor o carbono orgânico total desse solo é de $(30,7 \text{ g kg}^{-1})$, segundo Mao (2016) existe uma estreita relação entre o carbono orgânico do solo e a repelência da água do solo. Com isso, a utilização desse solo foi para observar o efeito da hidrofobicidade nas leituras dos sensores.

Os solos foram coletados a uma profundidade de 0 a 30 cm e passados em malha de 2 mm e secos à sombra em camada fina em seguida foram encaminhados para as análises e ensaios de calibração.

4.2 – Análise granulométrica e determinação da densidade do solo

Nas análises granulométricas foram empregados os métodos de acordo com as recomendações da EMBRAPA (1997), utilizando-se como agente dispersante a solução composta por Hidróxido de Sódio ($\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e Hexametáfosfato de Sódio ($(\text{NaPO}_3)_6 \text{ } 0,038 \text{ mol L}^{-1}$). Nessa análise foram usados 50g de cada solo e quatro repetições.

Para determinação da densidade do solo, utilizou-se o método do anel volumétrico (EMBRAPA,1997). Após a coleta do solo dentro do anel e posterior secagem em estufa do mesmo, a densidade do solo foi obtida por meio da equação 1.

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V} \quad (1)$$

Onde:

D_s a densidade do solo (g . cm⁻³),

M_{ss} a massa de solo seco (g) e

V o volume do anel (cm³).

4.3 – Determinação da umidade na capacidade de campo (UCC) e umidade no ponto de murcha permanente (UPMP)

Na determinação da UCC e da UPMP utilizou-se o sistema de câmara de pressão de Richards (SCPR), onde, sobre uma placa porosa, anéis com dimensões de 73 mm de diâmetro e 24 mm de altura (Figura 4) foram preenchidos com amostras de cada solo seco (TFSA).

Em seguida, essas amostras foram saturadas com água destilada e submetidas à uma tensão de 0,010 MPa para determinação da UCC nas amostras de solo com texturas arenosa e média e tensão de 0,033 MPa para UCC do solo argiloso. Para determinação da UPMP todas as amostras foram submetidas a uma tensão de 1,5 MPa. Conforme descrito por Klein (1998), após obtido o equilíbrio na câmara as amostras foram retiradas e em seguida foi determinada por meio do método gravimétrico (pesagens) as respectivas umidades.



Figura 4: Amostras de solo sobre placa porosa
(Fonte: Cássio Lopes)

4.4 – Preparo das amostras para obtenção das leituras

Com a textura, densidade, UCC e UPMP de cada solo já determinados, o próximo passo foi o preparo das amostras para obtenção das leituras. Para isso, utilizou-se um becker de 50ml para cada sensor (Figura 5), onde no mesmo, com auxílio de uma balança de precisão, foi pesado 100g de solo, previamente passado numa peneira com malha de 2mm. Esse solo foi submetido a remoção da umidade residual em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas.



Figura 5: Pesagem das amostras de solo em Becker de 50ml
(Fonte: Cássio Lopes)

4.5 – Montagem dos sensores e do sistema de aquisição de dados

Foram utilizados 6 sensores resistivos modelo HL-69 (Figura 6.a) que medem a resistividade elétrica do solo. Esses sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados composto por um micro controlador Arduino® UNO (Figura 6.b), que opera obedecendo um sketch (código) na linguagem C++. O código utilizado como descrito na Figura 7, determina que as leituras sejam realizadas de forma simultânea pelos 6 sensores instalados e que seja repetida leituras a cada 3 segundos. A alimentação do hardware foi dada por meio da porta USB 5v do computador utilizado para programação e monitoramento do sistema.

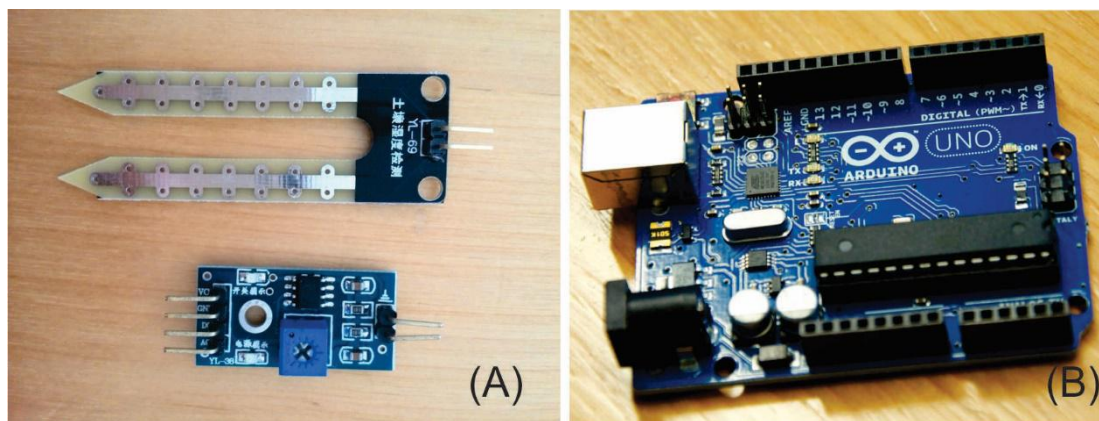


Figura 6: Sensor e Micro Controlador
(Fonte: Cássio Lopes)

```

// Monitor Serial os dados de 6 sensores

// Define as portas analogicas
int Sensor1 = 0;
int Sensor2 = 1;
int Sensor3 = 2;
int Sensor4 = 3;
int Sensor5 = 4;
int Sensor6 = 5;

// Define as variaveis para leitura analogica
int umidade1;
int umidade2;
int umidade3;
int umidade4;
int umidade5;
int umidade6;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  // Realiza a leitura analogica dos sensores de umidade
  umidade1 = analogRead(Sensor1);
  umidade2 = analogRead(Sensor2);
  umidade3 = analogRead(Sensor3);
  umidade4 = analogRead(Sensor4);
  umidade5 = analogRead(Sensor5);
  umidade6 = analogRead(Sensor6);

  // Escreve no Monitor Serial os dados dos 6 sensores
  Serial.print(umidade1);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(umidade2);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(umidade3);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(umidade4);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(umidade5);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(umidade6);

  // Aguarda o tempo para nova leitura/escrita
  delay(3000);
}

```

Figura 7: Sketch utilizado no micro controlador Arduino UNO
(Fonte: Cássio Lopes)

4.6 – Ensaio de Calibração

Com o sistema previamente montado/programado e as amostras de solo seco já pesadas nos beakers, o próximo passo foi a realização das leituras por classe de solo.

Os sensores, modelo HL-69, foram inseridos um a um nas amostras (Figura 8) e após isso o sistema foi acionado. Após 10 minutos (tempo necessário para estabilização das leituras) a leitura correspondente a 0% de umidade foi obtida, tendo em vista que toda a umidade residual das amostras foi previamente removida. Em seguida, com auxílio de uma pipeta de precisão, foi adicionado 1g de água na amostra, o correspondente a 1% do volume da amostra de solo (100g), dessa forma após os 10 minutos de leitura foi obtida a leitura (valor) correspondente a 1% de umidade, sendo essa a umidade gravimétrica do solo.

Esse procedimento, de se colocar água e fazer as leituras dos sensores, foi repetido para vários valores de umidade, até que se chegasse ao ponto onde as leituras (valores) se mostraram constantes mesmo com adição de água, indicando a perda de sensibilidade do sensor para tal amostra de solo. Dessa forma, procedeu-se a calibração dos seis sensores nos quatro diferentes solos.

Os valores de umidade gravimétrica foram convertidos para umidade volumétrica, por meio da Equação 2:

$$\theta = U.Ds \quad (2)$$

Onde:

θ a umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$),

U a umidade gravimétrica do solo (g g^{-1}) e

Ds a densidade do solo (g cm^{-3}).



Figura 8: Sensores HL-69 inseridos nas amostras de solo
(Fonte: Cássio Lopes)

4.7 – Tabulação e Tratamento dos dados

Para correlacionar os valores das leituras (“dados brutos em bytes” dos sensores HL-69) informados pelos aparelhos, com os resultados obtidos pelo método padrão (gravimétrico), foram obtidas equações de ajustes com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2).

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Solos apresentaram diferentes classes texturais, com valores de argila variando de 3 a 70%. Já os teores de areia variaram de 2 a 87%. Com relação as outras características físicas do solo analisadas, as mesmas se mostraram coerentes com sua textura, como observado a densidade do solo (Ds) se apresentou menor conforme o aumento do teor de argila de cada solo, esse resultado corrobora com os de Marcolin (2011), onde quando ajustaram os dados da Ds, somente em função da argila ou MO, observaram que a Ds apresenta comportamento negativo com o aumento do teor de argila. Com relação a CC e PMP os resultados apresentam um comportamento positivo com relação ao aumento do teor de argila, de modo que os valores tanto de CC quanto de PMP aumentam conforme aumenta o teor de argila, esse resultado está de acordo com Reichardt (1987) onde o mesmo afirma que a textura é o principal determinante da retenção de água, por atuar diretamente na área de contato entre as partículas sólidas e a água, Carvalho et al. (1999) em seu trabalho de obtenção de curvas de retenção observaram uma maior retenção de água, em todas as tensões em solos de textura mais fina.

Tabela 1: Atributos físico-hídricos referentes aos solos Neossolo, Latossolo, Latossolo hidrofóbico e Vertissolo

Classes de solos	Análise Granulométrica (Horizontes Superficiais)			Ds g cm ⁻³	CC % (Base de volume)	PMP
	Areia	Silte	Argila			
	%					
Neossolo	87,8	8,7	3,5	1,50	8,7	2,0
Latossolo 1	81,0	3,7	15,3	1,13	21,13	10,4
Latossolo 2	58,3	10,9	30,8	1,10	23,8	16,2
Vertissolo	2,0	28,0	70,0	1,02	31,6	19,5

Ds = Densidade do solo; CC = umidade do solo na capacidade de campo; PMP = umidade do solo no ponto de murcha permanente.

5.1 – Calibração Solo Textura Arenosa

Observa-se que os sensores apresentam diferença de resposta entre si, além disso foi observado que em ambos os sensores ocorreu comportamento não linear entre a umidade volumétrica do solo e a leitura do sensor, depois à medida que a umidade do solo aumentou, o valor de leitura do sensor diminuiu (Figura 9). Isso ocorre devido ao fato de se tratar de um sensor resistivo, o qual mede a resistência de um pulso elétrico emitido no solo, esse comportamento encontra-se dentro do esperado, pois segundo Mendes (2006), quanto mais água presente no solo, menor será a resistência elétrica medida.

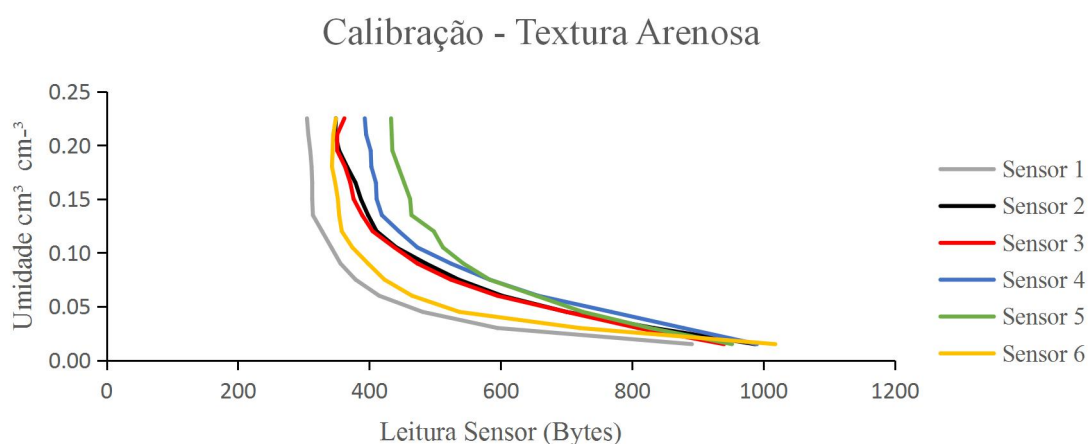


Figura 9: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura arenosa (Neossolo Regolítico)

Observa-se, ainda, que os seis sensores utilizados apresentaram um início de estabilização do valor da leitura a partir do momento em que a amostra do solo se encontra acima da umidade na capacidade de campo, ou seja, no início do processo de saturação. Desse modo, mesmo aumentando-se a umidade volumétrica não observou-se alterações na leitura do sensor. Esse resultado também foi observado por Gava et al. (2016), que em seu trabalho constataram que em condições de saturação, o sensor não apresenta precisão nas leituras, podendo ser observado que estas só estabilizaram a partir do ponto onde cessa a drenagem do excesso de água (umidade igual ou menor que umidade na capacidade de campo). Segundo Souza et al. (2018) em casos em que a intenção é medir a umidade do solo acima da sua capacidade de campo é preferível utilizar a metodologia padrão (método gravimétrico). No entanto, o fato dos sensores apresentarem perda de sensibilidade em umidade próximo a saturação, não elimina a possibilidade de utilização do mesmo na agricultura de precisão, como por exemplo, no

manejo da irrigação. Esta técnica, no manejo normalmente adotado pelos agricultores, visa repor a umidade do solo a ou próximo da capacidade de campo.

Na Figura 10 está apresentada a curva de ajuste obtida a partir da média das leituras dos seis sensores na calibração do solo arenoso. A equação de ajuste (3) vem em seguida e tem os seus respectivos parâmetros apresentados na Tabela 2, os erros inerentes a calibração são apresentados na Tabela 3.

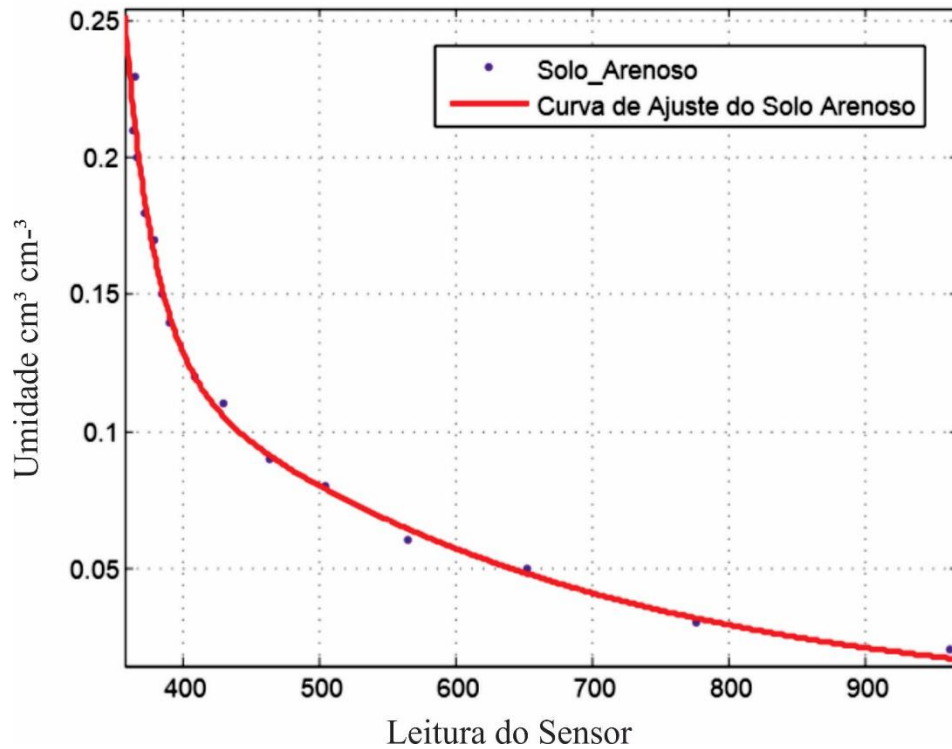


Figura 10: Curva média dos seis sensores em solo de textura arenosa (Neossolo Regolítico)

$$U(s) = ae^{bs} + ce^{ds} \quad (3)$$

onde s é o valor da leitura do sensor, $U(s)$ é a umidade relativa a esta leitura e os parâmetros definidos pelos valores apresentados na Tabela 2, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9899$.

Tabela 2: Parâmetros da curva de ajuste do solo arenoso

Parâmetro	Valor
a	1,909e+006
b	-0,04638
c	0,428
d	-0,003353

Tabela 3: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura arenosa

Umidade cm ³ cm ⁻³	Erro (%)					
	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6
0,00	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,02	7,48	2,49	2,39	2,80	1,14	5,71
0,03	23,42	7,21	4,12	13,00	6,44	7,34
0,05	26,21	7,39	7,39	17,82	11,22	17,62
0,06	26,51	6,61	5,37	16,35	15,82	17,65
0,08	24,90	6,21	3,83	15,52	15,52	16,18
0,09	23,17	4,89	2,09	13,09	17,19	14,10
0,11	20,47	2,56	1,86	10,00	19,07	13,02
0,12	19,51	0,86	0,61	9,20	22,21	12,15
0,14	19,42	2,14	0,17	7,53	19,08	9,15
0,15	18,38	0,91	1,96	7,17	20,47	8,21
0,17	17,41	0,00	2,11	8,18	19,53	8,18
0,18	16,09	1,57	2,38	8,38	19,41	7,75
0,20	15,30	3,28	4,10	9,84	18,85	6,01
0,21	15,50	4,22	3,39	8,72	19,45	5,05
0,23	16,48	4,43	0,87	7,62	18,58	4,43
Erro médio	19,35	3,65	2,84	10,35	16,26	10,17

Os dados da curva média dos seis sensores (Figura 10) foram ajustados por meio de uma equação exponencial (3), obtendo-se um ajuste com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9899$). Contudo, quando se observa os erros decorrentes da utilização dessa curva média (Tabela 3), vê-se que a utilização da equação média universal para solos de textura arenosa irá acarretar em alguns pontos em subestimação ou superestimação da umidade volumétrica do solo. Como exemplo, pode-se destacar os sensores 01 e 02, os quais apresentaram para o mesmo valor de umidade do solo erros de 26,5 e 6,6%, respectivamente. Além disso, o erro médio de cada sensor teve uma grande variação, com sensores com erro baixo (menos de 3%) e sensores com erros elevados (próximo de 20%). Essa variação dos erros mostra que existe variação de

respostas entre os sensores, independentemente da textura, indicando que os sensores devem ser calibrados individualmente.

Segundo Souza et al. (2018) 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.

Alguns fabricantes de sensores disponibilizam junto ao equipamento uma respectiva equação universal de calibração, no entanto estudos têm verificado que para obtenção de melhores resultados algumas equações previamente disponibilizadas por alguns fabricantes sejam desprezadas, em outras palavras estudos mostram a necessidade da realização em campo ou em laboratórios da calibração desses sensores.

Como exemplo pode-se citar o trabalho de Spelman et al. (2014), onde os autores testaram o sensor 10HS em quatro solos agrícolas representativos da região do Sudoeste da Flórida nos Estados Unidos. Esses 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.

Soncela et al. (2013) em seu trabalho com sensores de TDR, constataram que esses sensores 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.

5.2 - Calibração Solo Textura Argilosa

A Figura 11 mostra os resultados obtidos na calibração dos sensores em solo argiloso, onde notou-se que as curvas apresentaram o mesmo comportamento não linear observado na calibração para o solo arenoso. No entanto, observou-se que a estabilização da leitura do sensor com relação a umidade se deu em um ponto de umidade bem mais acima que o observado em solo de textura arenosa. Isso justifica-se pelo fato do solo argiloso possuir uma capacidade maior de armazenamento de água ou seja, sua CC (Umidade na capacidade de campo) é superior a CC de um solo de textura arenosa. Segundo Evett et al. (2006) 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.

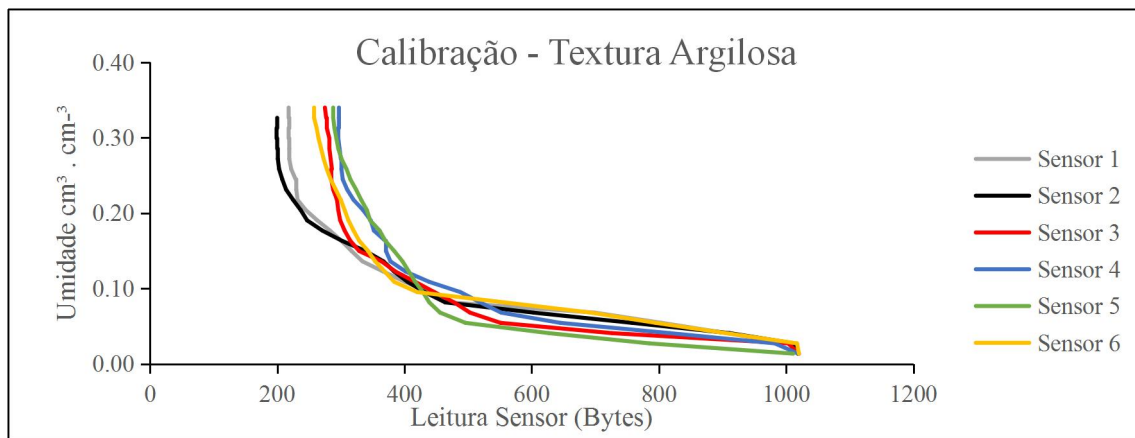


Figura 11: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura argilosa (Vertissolo)

Na figura 12 está apresentada a curva ajustada obtida a partir da média das leituras dos 06 sensores na calibração do solo argiloso. Obteve-se a partir da mesma uma equação média de comportamento exponencial (4) tendo na Tabela 4 os seus respectivos parâmetros. Na tabela 5 encontram-se os erros inerentes a calibração.

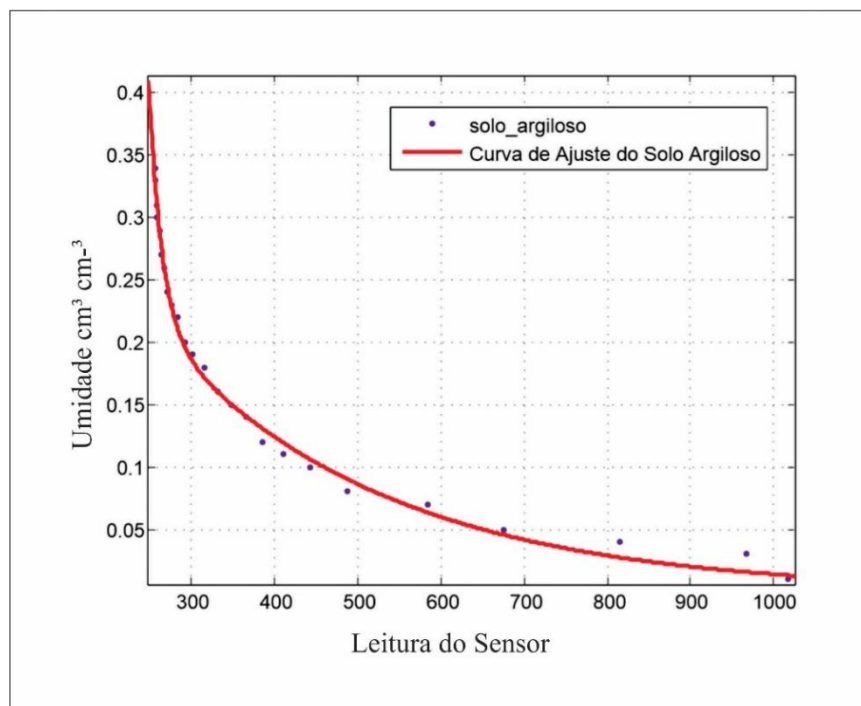


Figura 12: Curva média dos seis sensores em solo de textura argilosa (Vertissolo)

$$U(s) = ae^{bs} + ce^{ds} \quad (4)$$

onde s é o valor da leitura do sensor, $U(s)$ é a umidade relativa a esta leitura e os parâmetros definidos pelos valores apresentados na Tabela 4, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9934$.

Tabela 4: Parâmetros da curva de ajuste do solo argiloso

Parâmetro	Valor
a	1,349e+006
b	-0,06342
c	0,5308
d	-0,00363

Tabela 5: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura argilosa

Umidade cm ³ cm ⁻³	Erro (%)					
	sensor1	sensor2	sensor3	sensor4	sensor5	sensor6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,00
0,01	0,20	0,00	0,20	0,10	0,69	0,20
0,03	3,89	4,62	3,69	1,52	18,85	5,13
0,04	11,12	11,73	10,96	0,20	23,10	11,00
0,05	19,14	12,32	18,35	4,42	26,50	17,81
0,07	19,62	3,19	13,92	5,53	21,96	18,60
0,08	3,66	4,89	2,02	6,39	10,01	14,18
0,10	0,79	2,37	1,02	10,28	3,05	5,08
0,11	2,31	1,34	1,58	6,94	1,58	6,46
0,12	4,88	0,48	0,04	4,19	5,49	4,36
0,14	8,66	0,36	0,46	3,37	8,57	3,19
0,15	8,69	2,35	5,23	6,87	10,61	1,20
0,16	9,11	8,81	4,88	11,73	11,73	0,65
0,18	10,30	14,10	3,01	11,57	14,42	1,43
0,19	13,01	18,30	1,10	14,77	14,44	3,20
0,20	16,48	19,20	0,91	14,20	16,25	4,32
0,22	18,26	20,73	3,58	12,74	16,97	5,70
0,23	16,77	22,56	4,22	12,18	17,25	5,67
0,24	15,39	23,15	5,30	11,95	16,38	4,93
0,26	16,70	23,83	7,32	12,95	15,95	4,32
0,27	16,73	23,57	7,98	14,07	14,45	3,80
0,29	15,98	23,27	8,18	14,32	13,55	3,20
0,30	15,78	23,12	8,95	14,36	13,20	2,38
0,31	15,01	22,38	7,89	15,27	12,55	1,68
0,33	14,95	21,98	8,06	15,86	12,35	0,65
0,34	14,62	21,64	7,21	16,18	12,28	0,58
Erro médio	11,23	12,70	5,23	9,31	12,78	4,99

Seguindo a mesma metodologia, obteve-se uma equação de ajuste para o solo argiloso. Esta equação apresentou um comportamento também exponencial, assim como a obtida para o solo arenoso. No entanto apresentou um coeficiente de determinação R^2 um pouco mais aproximado de 1, sendo o mesmo $R^2 = 0,9934$ após ajustado. Quando observou-se os erros percentuais de cada sensor com relação à média ainda notou-se erros consideravelmente altos como no caso do sensor 5 que apresentou um erro de 26,5%. Por outro lado, no mesmo ponto de umidade o sensor 3 apresentou um erro de 4,42% o que mostra que assim como no solo arenoso os sensores apresentam variações de leituras entre si quando utilizados em solos de textura argilosa.

5.3 - Calibração Solo Textura Média.

Na figura 13 estão as curvas obtidas para os 6 sensores em solo de textura média. Obteve-se o mesmo comportamento não linear, havendo também uma estabilização da leitura do sensor após o ponto em que a amostra atinge a CC (umidade na capacidade de campo). O fato de ocorrer a estabilização da leitura nos três tipos de solo, ambos no ponto acima do ponto de CC, mostram que seu funcionamento está realmente de acordo a literatura onde Evett et al. (2006) mostram que, de fato, a frequência de oscilação dos sensores de capacitância diminui ou cessa com o aumento do teor de umidade.

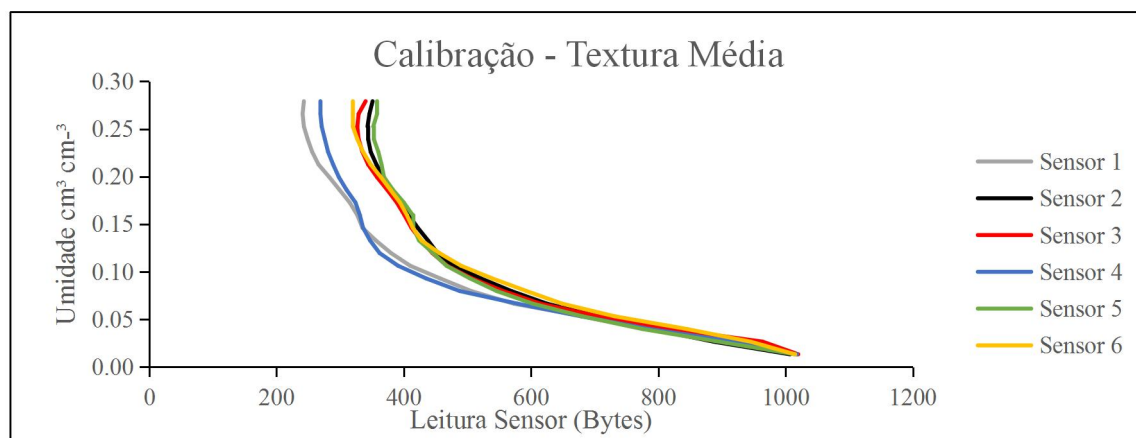


Figura 13: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura média (Latossolo)

Na figura 14 está apresentada a curva ajustada obtida a partir da média das leituras dos 06 sensores na calibração do solo de textura média. Obteve-se a partir da mesma uma equação média de comportamento exponencial (5) tendo na Tabela 6 os seus respectivos parâmetros. Na tabela 7 encontram-se os inerentes a calibração.

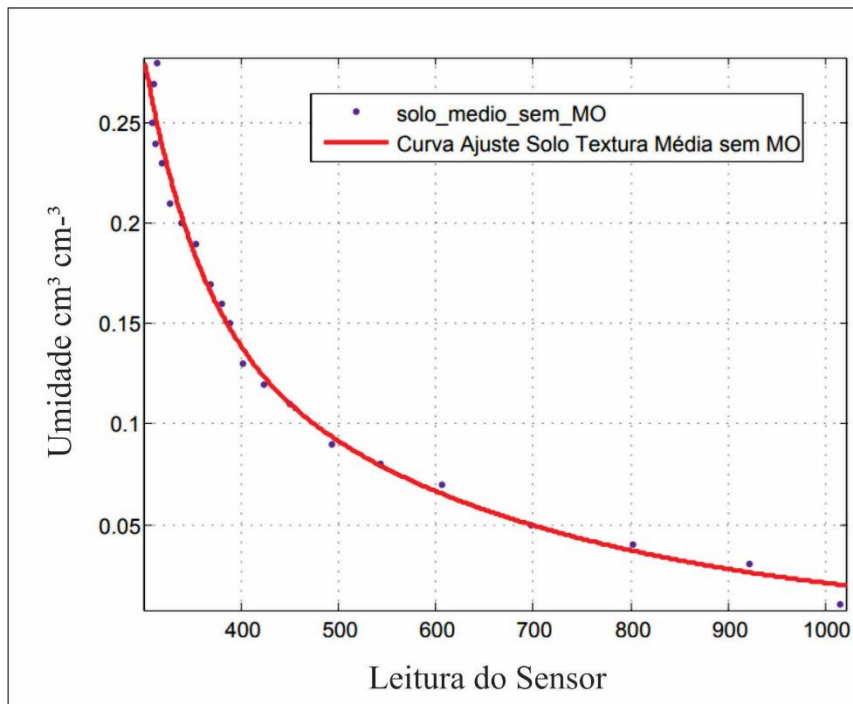


Figura 14: Curva média em solo de textura média (Latossolo)

$$U(s) = ae^{bs} + ce^{ds} \quad (5)$$

onde s é o valor da leitura do sensor, $U(s)$ é a umidade relativa a esta leitura e os parâmetros definidos pelos valores apresentados na Tabela 6, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9859$.

Tabela 6: Parâmetros da curva de ajuste do solo textura média

Parâmetro	Valor
a	27,27
b	-0,01786
c	0,3731
d	-0,002886

Tabela 7: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura média

Umidade cm ³ cm ⁻³	Erro (%)					
	sensor1	sensor2	sensor3	sensor4	sensor5	sensor6
0,00	0,10	0,00	0,10	0,00	0,00	0,20
0,01	0,16	0,82	0,46	0,26	0,03	0,03
0,03	0,00	3,80	4,56	0,33	2,93	2,49
0,04	0,10	1,76	2,10	2,14	3,51	5,21
0,05	2,10	1,05	1,19	2,68	2,39	4,92
0,07	5,65	2,91	1,26	4,67	0,71	6,86
0,08	6,81	4,79	2,39	10,13	0,55	9,21
0,09	7,46	5,50	2,67	11,91	2,06	9,15
0,11	9,02	6,07	3,85	13,24	3,62	8,73
0,12	10,31	6,92	5,04	14,56	5,27	7,63
0,13	11,74	8,60	5,87	13,97	5,12	6,12
0,15	13,88	8,48	5,91	13,62	6,68	6,43
0,16	14,17	7,09	5,25	13,12	8,66	6,30
0,17	14,71	6,68	5,32	12,27	8,30	6,68
0,19	15,66	7,76	5,50	12,55	8,04	6,91
0,20	16,76	8,24	5,29	12,35	8,53	7,06
0,21	18,94	8,79	4,82	11,93	11,22	6,04
0,23	19,83	8,98	4,91	12,00	12,73	5,22
0,24	20,45	9,90	5,11	11,82	12,78	4,47
0,25	21,44	10,88	5,71	12,39	13,79	3,45
0,27	22,38	11,43	5,96	13,37	15,30	3,06
0,28	22,49	11,96	8,45	14,19	14,51	1,75
Erro médio	11,55	6,47	4,17	9,71	6,67	5,36

Conforme os resultados exibidos na tabela 7 os sensores apresentam diferenças de leitura entre si quando utilizados em solos de textura média, de modo que, em um determinado ponto o erro do sensor 1 foi de 22,49% e nesse mesmo ponto de umidade o sensor 3 apresentou erro de 8,45% com relação à média. Nesse caso, assim como para outras texturas, a utilização da equação de ajuste irá acarretar em subestimação ou superestimação da umidade volumétrica.

5.4 - Calibração Solo Textura Média com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade.

Quanto aos resultados de calibração obtidos para o solo com presença de elevado teor de matéria orgânica (figura 16) notou-se um comportamento anormal da curva quando comparado com os resultados obtidos para outros solos inclusive para o solo de mesma textura (média) que não apresenta o mesmo teor de matéria orgânica, esse comportamento anormal está diretamente relacionado a presença da matéria orgânica neste solo. Doer et al. (2007) descrevem que as substancias orgânicas podem formar estruturas repelentes a água com grupos funcionais hidrofílicos e hidrofóbicos e que podem ter sentidos diferentes, dependendo da umidade do solo. Segundo Stevenson (1982), as substancias orgânicas do solo podem ter composição lipídicas, ou seja, lipídios livres oriundos principalmente da vegetação local, em quantidades baixa. Contudo, eles influenciam nos processos e caracterização do solo, como os relacionados à hidrofobicidade. De acordo Vogelmann et al. (2012) e Mao et al. (2016) a hidrofobicidade pode ser compreendida como a dificuldade de molhamento do solo pela água, podendo limitar o fluxo de água, geralmente devido ao recobrimento das partículas do solo por substâncias orgânicas hidrófobas, Mirbabaei et al. (2013), mostram que existe uma correlação positiva entre o teor de matéria orgânica do solo e a hidrofobicidade do mesmo. Essa influência da matéria orgânica sobre o funcionamento de métodos indiretos de determinação de umidade do solo é algo já estudado em alguns trabalhos como por exemplo o trabalho de Roth et al. (1992) que observaram e mostraram que são necessárias calibrações diferentes para solos com minerais ferrosos ou orgânicos. Dessa maneira torna-se comprometida a resposta anormal dos sensores para esse solo e conseqüentemente eleva-se ainda mais a necessidade da calibração dos sensores em solos dessa natureza, visto que suas leituras não apresentam um comportamento uniforme quando relacionado com os valores reais de umidade.

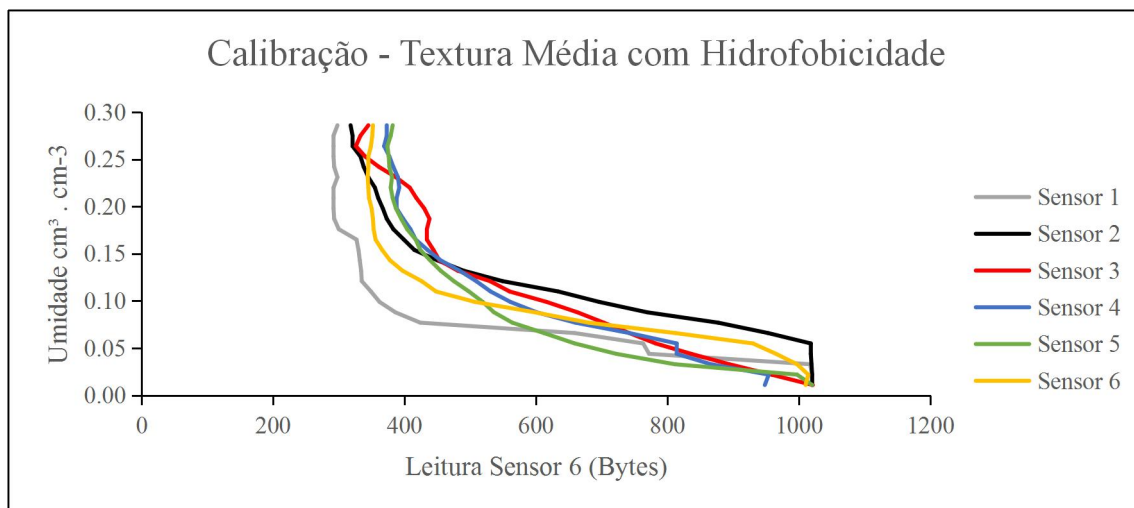


Figura 15: Curvas obtidas pelos 06 sensores em solo de textura média Latossolo com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade

Assim como observado nas curvas individuais (figura 16) a curva média (figura 17) apresentou comportamento fora do anteriormente observado em outros solos. Esse resultado está associado ao alto teor de matéria orgânica, dessa maneira quando ajustada a equação média universal obteve-se melhor ajuste com a equação de comportamento polinomial de grau nove (6), na Tabela 8 estão apresentados os parâmetros da respectiva equação. Os erros inerentes a calibração estão apresentados na Tabela 9.

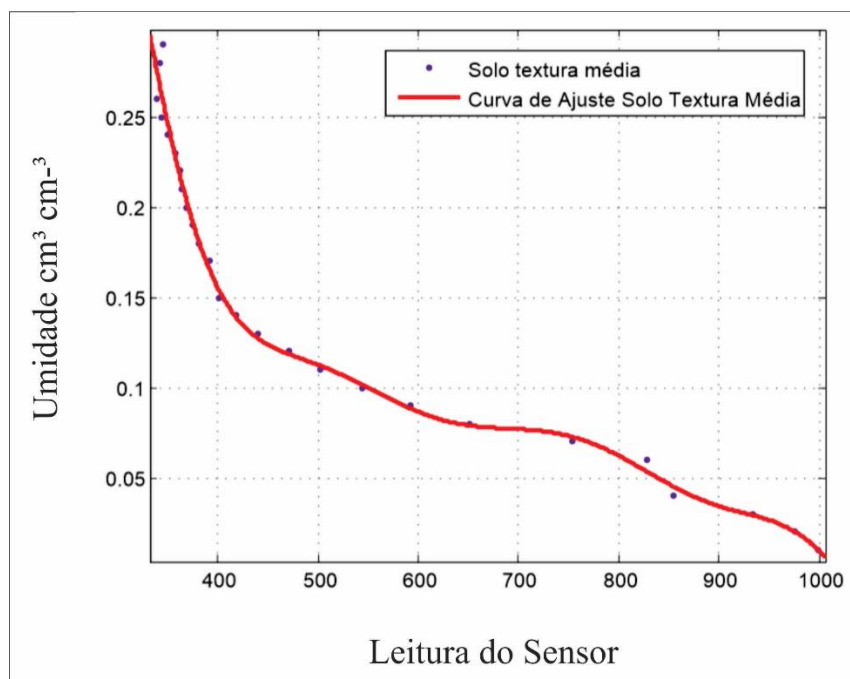


Figura 16: Curva média em solo de textura média (Latossolo) com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade

$$U(s) = \sum_{i=0}^9 a_i s^i$$

(6)

onde s é o valor da leitura do sensor, $U(s)$ é a umidade relativa a esta leitura e os coeficientes do polinômio estão apresentados na Tabela 08, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9905$.

Tabela 8: parâmetros da curva de ajuste do solo de textura média com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade

Coeficiente	Valor
a_0	-145,3
a_1	2,323
a_2	-0,01591
a_3	6,165e-005
a_4	-1,494e-007
a_5	2,353e-010
a_6	-2,414e-013
a_7	1,558e-016
a_8	-5,751e-020
a_9	9,255e-024

Tabela 9: Erro percentual de leitura de cada sensor com relação a média das leituras em solo de textura média com alto teor de matéria orgânica e efeito de hidrofobicidade

Umidade cm ³ cm ⁻³	Erro (%)					
	sensor1	sensor2	sensor3	sensor4	sensor5	sensor6
0,00	0,03	0,03	0,03	0,07	0,13	0,16
0,01	2,10	2,10	2,20	5,11	2,10	1,10
0,02	4,65	4,65	1,71	2,12	2,29	4,04
0,03	8,89	9,10	4,28	7,28	13,17	6,75
0,04	9,65	19,13	2,17	4,74	15,51	12,93
0,06	7,81	23,00	5,52	1,65	20,38	12,36
0,07	12,52	26,50	1,50	1,50	18,76	7,79
0,08	34,90	34,65	7,93	1,33	13,41	4,40
0,09	34,82	29,86	11,96	1,49	9,48	0,99
0,10	33,39	28,06	13,34	3,22	4,51	6,72
0,11	30,66	25,96	11,26	5,50	1,06	10,99
0,12	28,82	16,64	12,61	8,14	0,92	9,49
0,13	24,12	11,32	9,28	9,96	3,37	9,81
0,14	20,54	7,70	8,42	8,90	5,07	9,53
0,15	17,98	3,15	10,36	8,12	5,39	9,03
0,17	16,51	1,87	10,81	6,47	6,47	9,11
0,18	21,16	0,66	14,06	7,49	6,18	7,23
0,19	21,83	0,49	16,85	6,18	5,38	6,09
0,20	20,87	0,54	16,53	5,15	4,88	5,15
0,21	19,85	1,19	14,73	6,50	4,85	5,03
0,22	19,30	1,89	12,76	8,34	4,74	4,65
0,23	16,64	3,50	8,25	9,09	6,57	3,78
0,24	16,17	3,29	3,29	9,59	7,87	1,29
0,25	15,08	3,15	1,11	9,65	9,36	0,34
0,26	13,74	5,17	3,69	9,01	10,49	3,10
0,28	14,49	6,00	2,49	9,22	10,98	2,78
0,29	13,54	7,74	0,10	8,22	10,83	2,13
Erro médio	18,46	10,67	7,97	6,31	7,85	6,02

Com relação aos erros percentuais de leitura dos sensores com relação à média foram observados em alguns pontos erros acima de 30%, como é o caso do sensor 1 que no ponto em destaque na Tabela 9 apresentou erro de 34,9%, esses valores de erros reforçam ainda mais para esse tipo de solo a necessidade de uma calibração individual para esses sensores.

6 – CONCLUSÕES

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

As respostas dos sensores apresentaram comportamento distinto nos diferentes tipos de solos estudados, necessitando, portanto de calibração específica para cada solo.

Os sensores apresentam comportamento distintos entre si independente da textura, assim torna-se necessário a calibração individual.

Os sensores HL-69 apresentam comportamento menos regular quando utilizados em solos com elevados teores de matéria orgânica (solos hidrofóbicos).

Os sensores apresentam perda de sensibilidade quando submetidos a valores de umidade acima da capacidade de campo do solo, sendo recomendado sua utilização em casos onde a intenção é monitorar faixas de umidade entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo do solo.

Apesar das necessidades de calibração tanto individual como para diferentes texturas a utilização desse sensor mostra-se viável levando em conta o seu baixo custo e sua precisão na faixa de umidade entre a água disponível do solo.

7 – REFERÊNCIAS

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A ONU e a água**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/agua/>>. Acesso em: Abril 2018.

BANZI, M. **Primeiros passos com o Arduino**. São Paulo: Novatec, 2012

BENEDÍ, J. A.; MUÑOZ-CARPENA, R. **Soil-water-solute process characterization: an integrated approach**. Florida: CRC Press, 2005. 787 p.

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

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.

CALBO, A. G; Silva, W. L. C. **Sistema Irrigas para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos**. Brasília; Embrapa / Hortaliças, 2005.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. S.; COSTA, L. M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico VermelhoAmarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v34, p. 257-265, 1999.

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.

COELHO, E. F.; Or, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, p. 2007-2016, 1996.

COSTA, B. R. S; SANTOS, L. M.; BASSOI, L. H. Calibração do sensor de capacitância IRRIGAP® para a medida da umidade em solo do Semiárido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBEA, 2014.

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.

DOERR, S. H. et al. Water repellence of soils: new insights and emerging research needs. **Hydrological Processes**, 21, p. 2223-2228, 2007.

ELRICK, D.E.F.; TANNER, C.B. Influence of sample pretreatment on soil moisture retention. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v. 10, p. 124-135, 1955.

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

EVANS, Brian. **Beginning Arduino Programming**; writing code for the most popular microcontroller board in the world. New York City: Apress, 2011.

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. 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. **Symposium...** Bangkok: IISD, v. 14-21, p. 1021-1-1021-10, 2002.

FRIZZONE, J. A. **Necessidade de água para irrigação**. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzzone/LEB_1571/TEXTOS_COMPLEMENTAR_2_-_NECESSIDADE_DE_AGUA_PARA_IRRIGACAO.pdf>. Acesso em: 26 maio 2018.

GAVA, R.; DA SILVA, E. E.; BAIO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo/electronic moisture sensor calibration in different soil textures. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2016.

GOMES, E. P. et al. Avaliação do medidor eletrônico de umidade do solo “HIDROFARM” em Latossolo Vermelho Distroférico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n.1, p. 85 - 90, 2013.

GUBIANI, P.I. et al. Variabilidade temporal do armazenamento de água de um solo submetido a diferentes níveis de compactação. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Recife, **Anais...** 2005.

HUANG, Q. et al. Laboratory and field evaluation of five soil water sensors. **Canadian Journal of Soil Science**, v.84, p.431-438, 2004.

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, p.649-658, 2010.

KANDA K. et al. Field monitoring system using agri-Server. **SICE Annual Conference**. Tokio, Japan, 2011.

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.

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.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, v.30, p.959-964, 2000.

KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1998. 150p.

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.

- LIMA, J. E. F. W. et al. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de latossolos do cerrado em condições de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 23-32, jan. 2012.
- LIMA, J. R. S. et al. Comparação da sonda de nêutrons e de sensores tipo TDR para a determinação dos componentes do balanço hídrico no solo e evapotranspiração do feijão caupi. **Agropecuária Técnica**, v. 27, p. 21-29, 2006.
- MAO, J. et al. The influence of vegetation on soil water repellency-markers and soil hydrophobicity. **Science of the Total Environment** v. 566–567. p. 608–620, 2016.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 2, 2011.
- MCROBERTS, M. **Arduíno Básico**. São Paulo: Novatec, 2011.
- MENDES, P. C. de S. **Caracterização de um sensor para medição de umidade do solo com termo-resistor a temperatura constante**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.
- MILLAR, A. **Manejo racional da irrigação**: uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasília; IICA, 1984.
- MIRBABAIEI, S. M. et al. Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran. **Catena** v. 108. p. 26–34, 2013.
- MOURA, A. dos S. **Hidrofobicidade e atributos físico-hídricos e químicos de solos arenosos e argilosos com diferentes históricos de manejo**. 2018. 55 p. Dissertação (Mestrado em Produção Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco / UAG, Garanhuns, 2018.
- MUÑOZ-CARPENA, R. **Field Devices For Monitoring Soil Water Content**. University of Florida, 2015.
- 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.
- REICHERT, J. M. et al. A infiltração da água no solo sob manejo conservacionista. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Recife, **Anais...** 2005.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceito, processo e aplicações. Barueri: Manole, 2004.
- ROSSATO, L.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S. Avaliação da umidade do solo no Brasil durante o episódio El Niño (1982/83). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13, n.1, p.143-153, 2005.

- SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. The influence of texture on the moisture characteristics of soil. I. A critical comparison of techniques for determining the available water capacity and moisture characteristics curve of a soil. **J. Soil Sci.**, v. 16 p. 1- 15, 1965.
- SÁ, M. A. C. de; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; SANO, E. E. **Calibração e validação de sensor dielétrico para estimativa de teor de água em solos do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 32p. (Embrapa Cerrados. Comunicado técnico, 223).
- SCHMIDT, M. **Arduino: a Quick-Start Guide**. Estados Unidos: Pragmatic Bookshelf, 2011.
- 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, B. M. et al. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.2, p.277-286, 2012.
- SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, C. F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. **Aplicações de Técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**, v. 1, p. 25-45, 2008.
- SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2005, Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2003.
- SONCELA, R. et al. Construction and calibration of TDR probes for volumetric water content estimation in a Distroferic Red Latosol. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 5, p. 919-928, 2013.
- SOUZA, C. F. et al. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597, 2018.
- 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.
- STACHEDER, M.; KOENIGER, F.; SCHUHMANN, R. New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements. **Sensors**, Porto, v. 9, n.4, p. 2951-2967, 2009.
- STEVENSON, F. J. Soil lipids. Humus Chemistry, **Wiley**, p. 172-194, 1982.
- SYPERRECK, V. L. G. et al. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, p. 603, 2008.
- 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**. Viçosa-MG; v.29, n.2, p.161-168, 2005.

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

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.

VAZ, C. M. P. Aplicabilidade e limitações da TDR para a medida da umidade em solos brasileiros. In: WORKSHOP DE APLICAÇÕES DE TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL, 2, 2008, Taubaté, SP. **Anais...** Taubaté: UNITAU, 2008. p. 96-116.

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.

VOGELMANN, E. S. et al. Soil hydro-physical changes in natural grassland of southern Brazil subjected to burning management. **Soil Research**, v. 50, n. 6, p. 465-472, 2012.

WUTKE, E. B. et al. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.621-33, 2000.

YODER, R. E. et al. Soil water sensor performance. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v.14, n.2, p.121-133, 1998.