



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola



Guilherme Hideo Crubelatti

Avaliação de sensores capacitivos para determinação da umidade de substratos de cultivo

Campinas
2020



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Agrícola



Guilherme Hideo Crubelatti

Avaliação de sensores capacitivos para determinação da umidade de substratos de cultivo

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Agrícola junto à Faculdade de
Engenharia Agrícola da Universidade
Estadual de Campinas.

Orientador: Dr. Antonio Pires de Camargo

Campinas

2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C887a Crubelatti, Guilherme Hideo, 1994-
Avaliação de sensores capacitivos para determinação da umidade de substratos de cultivo / Guilherme Hideo Crubelatti. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Antonio Pires de Camargo.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Irrigação. 2. Substrato. 3. Conteúdo de água no solo. I. Camargo, Antonio Pires de, 1986-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Titulação: Bacharel

Banca examinadora:

Antonio Pires de Camargo [Orientador]

Zigomar Menezes de Souza

Aline Azevedo Nazário

Data de entrega do trabalho definitivo: 16-12-2020



Avaliação de sensores capacitivos para determinação da umidade de substratos de cultivo

Guilherme Hideo Crubelatti

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo
Orientador

.....
Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

.....
Prof. Dra. Aline Azevedo Nazário

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Luis Crubelatti e Emilia Yumi Matsuoka Crubelatti, e à minha irmã Marina Yumi Crubelatti por sempre me apoiarem em todos momentos e decisões da minha vida. A minha namorada Mariane Bernardes, pela paciência, suporte e amor durante esses últimos anos. Ao meu orientador Antonio Pires de Camargo, por sua disponibilidade, orientação e profissionalismo ao longo do desenvolvimento do projeto. A todos que passaram na minha vida acadêmica, professores, orientadores, amigos e funcionários da Feagri/Unicamp. E aos que utilizarem esta obra como fonte de estudo.

EPÍGRAFE

À DEUS,
Aos meus pais, irmã e namorada.

RESUMO

A irrigação é necessária em cultivos conduzidos em ambiente protegido e costuma ser efetuada utilizando sistemas de irrigação localizada ou outros sistemas para cultivo sem solo. Independente do sistema de irrigação, a quantidade de água aplicada deve ser controlada para melhor eficiência no uso de recursos e para desempenho adequado da cultura. Para o manejo da irrigação em cultivos em substrato, há a necessidade de identificar sensores de umidade adequados, a fim de assegurar a confiabilidade das medições. Este trabalho teve como objetivo determinar curvas de calibração do sensor capacitivo modelo EC-5 da Decagon Devices para substratos de uso comercial. Foram avaliadas vinte unidades do sensor EC-5 em substratos comerciais recomendados para a produção de mudas de cana-de-açúcar, citros e plantas arbóreas nativas. Para cada tipo de substrato foram condicionados 8 níveis conhecidos de conteúdo de água na amostra de substrato, utilizando-se o método de calibração recomendado pelo fabricante dos sensores. Após obtida a equação proveniente do método de calibração, a mesma foi confrontada com a equação fornecida pelo fabricante. Concluiu-se que as equações calibradas para cada substrato apresentaram indicadores de acurácia superior à equação informada pelo fabricante, evidenciando a necessidade de calibração dos sensores. A equação calibrada utilizando todos os dados experimentais é relativamente similar às equações calibradas individualmente para cada um dos substratos, indicando que, para os substratos avaliados uma única equação calibrada poderia ser satisfatória.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação; substrato; conteúdo de água no solo.

ABSTRACT

Irrigation is necessary in crops grown in greenhouses and is usually carried out using micro irrigation or other soilless culture systems. Regardless of the irrigation system, the amount of water applied must be controlled for better efficiency in the use of resources and for adequate crop performance. For the management of irrigation in substrate crops, there is a need to identify suitable soil moisture sensors in order to ensure the reliability of the measurements. This work aimed to determine calibration curves of the capacitive sensor model EC-5 from Decagon Devices of substrates for commercial use. Twenty units of the EC-5 sensor were evaluated on commercial substrates recommended for the production of sugarcane seedlings, citrus and native tree plants. For each type of substrate, 8 known levels of water content in the substrate sample were conditioned, using the calibration method recommended by the sensor manufacturer. After obtaining the equation from the calibration method, it was compared with the equation provided by the manufacturer. It was concluded that the calibrated equations for each substrate presented accuracy indicators superior to the equation informed by the manufacturer, indicating the need for sensor calibration. The calibrated equation using all experimental data is relatively similar to the individually calibrated equations for each of the substrates, indicating that, for the evaluated substrates, a single calibrated equation could be satisfactory.

KEY WORDS: Irrigation; substrate; volumetric water content.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	Sistemas de irrigação em ambientes protegidos	12
2.1.1	Irrigação localizada	12
2.1.2	Subirrigação	12
2.2	Substratos	13
2.2.1	Propriedades dos substratos	13
2.3	Conteúdo de água	14
2.4	Métodos de determinação da umidade do solo	15
2.4.1	Métodos de determinação direta	15
2.4.2	Métodos de determinação indireta	16
3	METODOLOGIA	17
3.1	Localização dos ensaios	17
3.2	Sensor de conteúdo de água no solo e sistema de aquisição de dados	17
3.3	Substratos avaliados e quantificação do conteúdo de água	19
3.4	Calibração	20
3.5	Análise de dados	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5	CONCLUSÕES	25
6	REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é necessária em cultivos conduzidos em ambiente protegido e costuma ser efetuada utilizando sistemas de irrigação localizada ou outros sistemas para cultivo sem solo. Qualquer que seja o sistema de irrigação, a quantidade de água aplicada deve ser controlada para melhor eficiência no uso de recursos. Superestimar a lâmina de irrigação resulta na aplicação de água em excesso, acarretando aumento dos custos da irrigação e potenciais problemas para o ambiente e para a cultura. Por outro lado, a aplicação de lâminas insuficientes pode restringir o desempenho da cultura e eventualmente ocasionar problemas de salinidade nos cultivos em substrato.

A quantidade de água consumida pelas culturas pode ser estimada com base em várias metodologias, sendo que as mais difundidas no meio agrícola são baseadas na determinação do conteúdo de água no solo de forma direta ou indireta, ou ainda em metodologias que estimam a evapotranspiração da cultura a partir de dados meteorológicos ou de lisimetria. A irrigação deve sempre complementar a quantidade de água consumida pelas plantas e que não for suprida pela precipitação ocorrida em um dado período. Questões relacionadas à quando e quanto irrigar são influenciadas por condições climáticas do local, cultura e respectivo estágio fenológico, profundidade efetiva do sistema radicular, características físicas e umidade do meio de cultivo (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008).

O conteúdo de água no solo, ou umidade do solo, é um indicador da quantidade de água presente no perfil de solo, sendo que sua determinação é essencial para o correto manejo da irrigação. A manutenção da umidade do meio de cultivo dentro de limites desejados contribui para melhorias na eficiência de uso de recursos, produtividade da cultura, qualidade dos produtos, e ainda, pode reduzir impactos ambientais ou desperdícios associados a percolação de água e lixiviação de nutrientes.

Para irrigar vasos de plantas cultivadas em substratos com a quantidade certa de água, é importante quantificar adequadamente o conteúdo de água no substrato para decidir quando e quanto irrigar (FERRAREZI; IERSEL; TESTEZLAF, 2015; NEMALI et al., 2007). Sensores capacitivos para determinação de umidade emitem um sinal elétrico de resposta que é proporcional à constante dielétrica do meio de cultivo, sendo que, quanto mais úmido estiver o meio de cultivo, maior será o sinal de resposta.

O processo de calibração desses sensores consiste em obter uma curva correlacionando umidade volumétrica e sinal analógico ou digital fornecido pelo sensor. Sensores de umidade confiáveis e acessíveis para determinar o conteúdo de água em

substratos são limitados, existindo a necessidade de identificar sensores de umidade adequados para diferentes tipos de substratos, a fim de assegurar a confiabilidade das medições (NEMALI et al., 2007). Também é importante que sejam conhecidas as limitações de sensores, para que os mesmos possam ser empregados corretamente.

1.1 Justificativa

Atualmente a busca pelo uso eficiente de água visando o aumento de produtividade e sustentabilidade está cada vez mais presente no campo. A determinação correta da umidade no meio de cultivo é importante para o manejo adequado da irrigação e pode ser realizada utilizando sensores capacitivos.

As seguintes questões motivaram esse estudo:

- (1) A equação de calibração fornecida pela fabricante é adequada para diversos substratos?
- (2) Há a necessidade de calibração individual dos sensores?
- (3) Para dada umidade do meio de cultivo, o sinal de resposta do sensor é estável?
- (4) Há a necessidade de calibração dos sensores para cada tipo de substrato?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Determinar curvas de calibração e avaliar a estabilidade de sinal do sensor capacitivo modelo EC-5 da Decagon Devices para substratos de uso comercial.

1.2.2 Objetivos Específicos

Esse estudo teve como objetivos específicos:

- (1) determinar curvas de calibração para o sensor capacitivo modelo EC-5 da Decagon Devices para substratos de uso comercial;
- (2) quantificar erros nas estimativas de umidade;
- (3) determinar se há a necessidade de calibração individual de sensores;
- (4) avaliar a estabilidade do sinal de resposta do sensor para vários níveis de umidade nos meios de cultivo;
- (5) comparar a acurácia das equações calibradas com as equações recomendadas pelo fabricante.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas de irrigação em ambientes protegidos

Os sistemas de irrigação em áreas agrícolas são parte do conjunto de técnicas, que ao serem empregadas adequadamente, influenciam diretamente na produtividade final da cultura. No Brasil, apesar das áreas irrigadas representarem apenas cerca de 18% da área total cultivada, elas contribuem com 42% da produção total do país (CHRISTOFIDIS, 2002).

Independentemente do sistema de irrigação adotado, todos os sistemas apresentam vantagens e desvantagens, sendo que é necessário um estudo técnico e econômico para selecionar o melhor para cada situação.

2.1.1 Irrigação localizada

A irrigação localizada ou microirrigação compreende na aplicação de água molhando apenas parte da área ocupada pelas plantas (SANTOS et al., 1997). Como vantagens, os sistemas são caracterizados pelo uso reduzido de energia, mão de obra e eficiente uso de água e fertilizantes, além de poder ser usados em solos de diferentes texturas e declividades, bem como permitem a automatização total da irrigação (MAROUELLI; SILVA, 1998). As principais limitações são o alto investimento inicial e custos de manutenção, assim como preocupações com questões de qualidade de água e riscos de obstrução de gotejadores. Dentre os sistemas de irrigação localizada destacam-se o gotejamento e a microaspersão.

2.1.2 Subirrigação

A subirrigação é o método de irrigação que utiliza a ação da capilaridade no processo de umedecimento do meio de cultivo e das raízes da cultura. Ela apresenta vantagens como a possibilidade de aplicação de fertilizantes via a água de irrigação, contribui para reduzir o estabelecimento de doenças foliares fúngicas e bacterianas já que não há molhamento da parte aérea da planta, redução de custos operacionais e possibilidade de aplicação de defensivos e estimuladores de crescimento vegetal (ROUPHAEL et al., 2006). Em relação as desvantagens destacam-se a possibilidade de proliferação de doenças devido o sistema fechado (SCHMAL et al., 2011) e a possibilidade de acúmulo de sais na superfície do meio de cultivo. O piso de inundação, calhas em desníveis, mesas de subirrigação, bandejas móveis, manta capilar são exemplos de componentes e tipos de sistemas de subirrigação.

2.2 Substratos

O substrato é o meio de cultivo cuja função é suportar o crescimento de raízes de plantas cultivadas em recipientes, em substituição ao solo. Geralmente o substrato é constituído por uma mistura de dois ou mais materiais formulados e manipulados, com o objetivo de alcançar determinadas propriedades físicas e químicas (FERMINO, 2003).

Os substratos são constituídos por três fases, sendo elas a sólida, a gasosa e a aquosa. O conjunto dessas fases determina qual propriedade o substrato terá e no que ele diferenciará do solo *in situ*.

2.2.1 Propriedades dos substratos

(a) Massa específica do substrato

A massa específica do substrato ("bulk density", ρ) é expressa pela relação entre a massa de sólidos e o volume de uma amostra de substrato. Para a interpretação de outras características como porosidade, espaço de aeração e disponibilidade de água, salinidade e teor de nutrientes é fundamental conhecer a massa específica do substrato (FERMINO, 2003).

Existem diversas metodologias atualmente para determinar esse atributo físico, no entanto, todas são baseadas no mesmo princípio: comprimir o substrato em uma pressão e volume conhecido, e, posteriormente, secar completamente o mesmo e pesar (WALLACH, 2019). Portanto, a massa específica do substrato depende diretamente da pressão aplicada no momento do preenchimento e da umidade presente nas partículas, ou seja, essa propriedade está relacionada ao grau de compactação do substrato.

(b) Distribuição de tamanho de partículas

A distribuição de tamanho de partículas é uma propriedade física que consiste em isolar determinados tamanhos de partículas e medir a quantidade de cada um deles no meio que está sendo estudado. Essa propriedade definirá a textura do meio, o que determinará outras características como a geometria e porosidade interna, suas interações com fluidos e solutos, bem como sua compressibilidade e resistência (WALLACH, 2019).

(c) Porosidade total

A porosidade total é definida pela razão entre o volume de espaços porosos (fase gasosa e líquida) e o volume total da amostra. Essa propriedade está diretamente relacionada a distribuição de tamanho de partículas.

(d) Distribuição de Poros

Os poros são classificados de acordo com seu tamanho em: macroporos ($> 416 \mu\text{m}$); mesoporos ($10 \text{ a } 416 \mu\text{m}$); microporos ($0,2 \text{ a } 10 \mu\text{m}$); e ultramicroporos ($<0,2 \mu\text{m}$) (DRZAL et al., 1999).

Os macroporos tem um papel fundamental para permitir que as raízes, gases e a água penetrem no meio, portanto, quanto maior a abundância de poros grandes, maior a facilidade para trocas gasosas e infiltração de água (WALLACH, 2019). Os mesoporos e microporos contém água disponível para as plantas, enquanto os ultramicroporos contém uma fração de água que é indisponível às plantas (FERMINO, 2003).

2.3 Conteúdo de água

Existem quatro níveis de umidades de solo de maior interesse para a irrigação, sendo eles a condição de saturação, capacidade de campo, umidade crítica e o ponto de murcha permanente.

A umidade de saturação é caracterizada quando todos os poros do solo estão preenchidos com água, ou seja, a água se movimenta livremente através dos macroporos em função da força gravitacional. Já a capacidade de campo representa a quantidade de água retida no solo após drenagem do excesso por ação de forças gravitacionais. Quando as forças gravitacionais entram em equilíbrio com forças da matriz do solo, atinge-se a condição de capacidade de campo. A umidade crítica caracteriza a umidade abaixo da qual haverá estresse hídrico para planta e varia conforme a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico. A umidade de ponto de murcha permanente representa um nível de umidade abaixo do qual a planta não é capaz de extrair água do solo.

Entre os níveis apresentados anteriormente, se encontram faixas que são de interesses para o manejo de irrigação e drenagem do solo. A primeira faixa se localiza entre a umidade de saturação e a umidade de capacidade de campo e corresponde a uma faixa de umidade excessiva no solo. Nessa faixa as forças gravitacionais são maiores do que as forças da matriz do solo e a água percola até que tais forças entrem em equilíbrio. Além

disso, em tais condições é comum ocorrer problemas de aeração deficiente do solo e outros problemas tratados utilizando técnicas de drenagem. A água percolada provoca lixiviação de nutrientes e favorece riscos de contaminação do lençol freático e consequentemente danos ambientais.

A segunda faixa se encontra entre a capacidade de campo e a umidade crítica. Essa faixa abrange condições de adequado suprimento hídrico para as plantas, sendo que nesse cenário existe uma ótima relação entre disponibilidade de água e trocas gasosas. A terceira faixa corresponde as umidades entre a condição crítica e o ponto de murcha permanente. Nessa faixa as plantas são capazes de extrair água do solo, mas é esperado déficit hídrico e prejuízos ao desempenho da cultura. Na faixa entre a condição de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, a quantidade de água está presente nos mesoporos e microporos e é responsável pelas interações físicas, químicas e biológicas entre o solo e o meio ambiente.

Por fim, a quarta faixa se localiza abaixo da umidade de ponto de murcha permanente. Nessa faixa a água está armazenada nos ultramicroporos e forma uma película muito fina em torno da superfície das partículas do solo. Por estar interagindo por alta força de adesão com essas partículas, essa água não é disponível para as plantas.

2.4 Métodos de determinação da umidade do solo

O conhecimento da umidade do solo é essencial para um manejo adequado de irrigação. Várias técnicas foram desenvolvidas para a determinação da umidade do solo nas últimas décadas. Essas técnicas são divididas em métodos de determinação direta e métodos de determinação indireta.

2.4.1 Métodos de determinação direta

Como principal método de determinação direta, o método gravimétrico é utilizado como metodologia padrão e de referência para a calibração de outras metodologias. Esse método é caracterizado por sua alta exatidão e existem duas formas de execução. A primeira utiliza amostra deformada de solo, na qual a amostra é submetida à uma estufa à 105 °C por 24 horas ou até a estabilização da massa, e, por cálculo de diferença de massas, é possível determinar a quantidade de água no solo. A segunda forma de execução para a determinação de umidade pelo método gravimétrico utiliza-se uma amostra indeformada e a partir da massa específica do solo, determina-se a umidade volumétrica.

Embora o método gravimétrico de medição do conteúdo de água no solo seja conhecido por sua exatidão, muitas vezes o uso desse método é inviável devido aos custos de mão de obra, tempo para obtenção de respostas e por ser um método destrutivo (FARES, 2016).

Como alternativa, os métodos de determinação indireta foram desenvolvidos nos últimos anos com o objetivo de suprir as necessidades do campo.

2.4.2 Métodos de determinação indireta

Os métodos de determinação indireta são caracterizados por obter os resultados de forma mais rápida do que o método gravimétrico a partir de atributos físico-químicos do solo. Como principais exemplos destes métodos temos a sonda de nêutrons, os tensiômetros e as técnicas baseadas em propriedades dielétricas do solo.

(a) Sonda de Nêutrons

A sonda de nêutrons é um método que utiliza uma fonte, que dentro do solo, emite nêutrons rápidos e com energia. Com o auxílio de um detector, verifica-se a quantidade de nêutrons lentos, os quais perderam energia ao encontrar um átomo de hidrogênio. Quanto maior a umidade do solo, maior a quantidade de nêutrons lentos indicada pelo instrumento. Apesar de ser um método que fornece resposta rápida, ele possui um elevado custo, só é possível uma medição pontual e possui o risco de acidentes radioativos. Devido à essas características, a sonda de nêutrons atualmente só é utilizada para pesquisas e em meio acadêmico.

(b) Tensiômetros

Os tensiômetros são equipamentos que determinam o potencial mátrico do solo. O potencial mátrico pode ser convertido em umidade e serve como indicador da energia com que a água está retida no solo. Apesar de ser um método não destrutivo, de baixo custo e de possível automatização, o equipamento utilizado requer manutenção periódica, leituras sempre no mesmo horário para evitar interferências significativas devido a flutuações de temperatura. Além disso, para determinar a umidade do solo a partir dos tensiômetros é necessário o conhecimento da curva de retenção de água no solo.

(c) Técnicas baseadas em propriedades dielétricas do solo

Os instrumentos mais comuns disponíveis para o monitoramento da umidade do solo usam a técnica de capacitância ou a reflectometria no domínio do tempo (TDR). Ambos os métodos aproveitam a alta constante dielétrica da água, em comparação com a do solo, para quantificar seu conteúdo volumétrico de água (θ) (FRANCESCA et al., 2010).

A incerteza de medição dos sensores de umidade do solo é afetada por atributos físicos do solo, como a massa específica do solo, porosidade, textura e temperatura. Além das propriedades físicas, a precisão também está diretamente relacionada aos atributos químicos como pode citar a salinidade normalmente expressa pela condutividade elétrica (FARES, 2016).

Para irrigar plantas cultivadas em substratos com a quantidade certa de água, é importante medir com precisão o conteúdo de água do substrato para decidir quando e quanto irrigar (NEMALI et al., 2007). Para manter as condições ideais da umidade no substrato, é necessário o monitoramento frequente dos fatores ambientais.

As culturas em estufa são geralmente cultivadas em substratos de alta porosidade. Vários tipos de sensores de umidade do solo não operam adequadamente nesse meio e a confiabilidade da medição em tais condições podem ser comprometida. É necessário identificar sensores de umidade adequados para substratos (NEMALI et al., 2007).

Para os sensores Decagon-EC5, uma equação de calibração é usada para descrever a relação entre o sinal elétrico de resposta do sensor e o conteúdo volumétrico de água do solo. A precisão da medição varia com o tipo de solo, salinidade, compactação e, possivelmente, temperatura.

3 METODOLOGIA

3.1 Localização dos ensaios

O estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP).

3.2 Sensor de conteúdo de água no solo e sistema de aquisição de dados

Avaliou-se o sensor capacitivo modelo EC-5 (Decagon Devices Inc., WA, EUA) com dimensões de 89 x 18 mm (L x W). O sensor EC-5 determina o conteúdo volumétrico de água (θ) indiretamente.

O fabricante declara as seguintes especificações técnicas sobre o sensor EC-5:

1. Pode ser alimentado por uma fonte de tensão na faixa de 2,5 a 3,6 Vcc.
2. A frequência de 70 MHz minimiza os efeitos de salinidade e textura, tornando esse sensor preciso em quase todos os meios (solos ou substratos).
3. O erro de medição θ é de $\pm 3\%$ para todos os tipos e substratos minerais do solo e $\pm 2\%$ para calibração específica do solo, sendo de 0 a θ saturação.
4. A resolução das medições é de $0,001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de conteúdo volumétrico de água em solos minerais.

A Decagon Devices afirma que, usando excitação de 2,5 Vcc, substratos para vasos em várias salinidades foram testados identificando-se a Eq. 1. Além disso, para a mesma tensão elétrica de alimentação, eles também afirmam que uma única equação de calibração (Eq. 2) geralmente é suficiente para todos os tipos de solos minerais com condutividades elétricas de 0,1 a 10 dS m^{-1} de extrato de saturação. Nas duas equações, θ é estimado a partir da tensão de saída medida em milivolts (mV).

$$\theta_{E1} = 0.00211 \text{ mV} - 0.675 \quad (1)$$

$$\theta_{E2} = 0.00119 \text{ mV} - 0.401 \quad (2)$$

em que: θ_{E1} e θ_{E2} são, respectivamente, os conteúdos volumétricos da água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) estimados pelas Eqs. (1) e (2), mV é o sinal de saída (milivolts).

Durante as experiências, o sensor foi alimentado por uma fonte de tensão de 2,5 Vcc e os sinais analógicos de saída variaram de 250 a 1000 mV. O sinal de saída do sensor EC-5 foi aplicado a um filtro RC low-pass (frequência de corte de 480 Hz) e, em seguida, conectado a um conversor analógico-digital de resolução de 16 bits modelo ADS1115 (TEXAS INSTRUMENTS, 2018). Internamente, o circuito integrado ADS1115 possui um amplificador de ganho programável (PGA), que foi configurado para fornecer ganho de 4x, a fim de melhorar a precisão das medições de tensão na faixa de 0 a 1024 mV. Finalmente, o ADS1115 se comunicou com um microcontrolador ATmega328P (Plataforma Arduino) usando o protocolo de comunicação I2C. Um aplicativo de desktop simples foi desenvolvido utilizando a linguagem C# para facilitar a aquisição de dados ao longo dos experimentos.

Os dados foram registrados em arquivos Comma Separated Values (CSV). Para cada condição de teste, o tamanho da amostra foi de 100 leituras coletadas na taxa de amostragem de 5 Hz. O sensor em teste permaneceu energizado durante o período de 20 s, o que corresponde à duração da aquisição de dados para cada condição de teste.

3.3 Substratos avaliados e quantificação do conteúdo de água

O sensor EC-5 foi examinado para medir θ em quatro tipos de substratos comumente usados para produção de mudas e em horticultura (Tabela 1). Primeiramente, foram coletadas quatro amostras de cada lote de substrato e a massa específica do substrato (ρ) foi obtida pelo método do anel volumétrico, sendo a razão entre a massa do substrato seco na estufa (m_s) e o volume do substrato (V). As determinações do espaço de aeração e da capacidade de água disponível (CAD) foram realizadas por meio do uso de funis de tensão, com 0, 10, 50 e 100 cm de coluna d'água, correspondentes às tensões de 0, 1, 5 e 10 kPa, respectivamente (DE BOODT e VERDONCK, 1972). Ressalta-se que esses os limites de tensão adotados são típicos no estudo de substratos.

Posteriormente, foram obtidas as seguintes propriedades físicas da água: porosidade total, que corresponde ao conteúdo de água presente nas amostras saturadas sob tensão de 0 kPa; limites superior (θ_{UL}) e inferior (θ_{LL}), representados pelo conteúdo de água sob tensões de 1 e 10 kPa, respectivamente; e CAD, que representa a quantidade de água entre as tensões de 1 e 10 kPa (i.e. $\theta_{UL} - \theta_{LL}$). Além disso, os atributos químicos pH e condutividade elétrica (CE) foram determinados com base em quatro amostras. O extrato foi preparado por extração de uma solução de 1 volume de substrato e 5 volumes de água. As principais características de cada substrato são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização geral dos substratos de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (SC), mudas de citros (SL) e Nativas (SN) realizada no Laboratório de Solos da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP)

Substrato	Lote	Composição*	ρ (kg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)	θ_{UL} (m ³ m ⁻³)	θ_{LL} (m ³ m ⁻³)	CAD (mm mm ⁻¹)	pH	CE (dS m ⁻¹)
Cana-de-açúcar (SC)	4051	Casca de <i>Pinus elliottii</i> ; pó de coco; vermiculita; areia fina.	324±4	0,75	0,44	0,20	0,24	5,6±0,02	1,1±0,01
Citros (SL)	1075	Casca de <i>Pinus elliottii</i> ; carvão vegetal; vermiculita	245±7	0,79	0,47	0,26	0,21	6,0±0,01	0,9±0,00
Nativas (SN)	1072	Areia fina; vermiculita	251±5	0,71	0,41	0,22	0,19	5,8±0,01	1,4± 0,01

* Os substratos foram adquiridos em Holambra-SP, mas o fornecedor não informa as quantidades de cada composto empregado para produzir o substrato.

3.4 Calibração

Neste estudo, utilizou-se a metodologia de calibração recomendada pelo fabricante do sensor (COBOS; CHAMBERS, 2010). Além disso, um conjunto de 20 sensores EC-5 de cerca de 2 anos de uso foi avaliado. O procedimento experimental foi descrito abaixo e também foi realizado para cada substrato.

Primeiramente, as amostras foram secas a 65 °C por 24 h e imediatamente levadas ao dessecador a vácuo. Depois disso, as amostras foram deixadas ao ar livre por um período de 72 h, a fim de restabelecer o equilíbrio entre o substrato e a umidade ambiente. A partir desta etapa inicial, subamostras, de acordo com o correspondente ρ a 1 dm³ de volume, foram novamente secas a 65 °C por 24 h para determinar θ no momento do início dos testes (isto é, o primeiro nível de conteúdo de água). A partir daí, foram adicionados volumes crescentes de água deionizada até atingir a condição próxima da saturação, totalizando 7 níveis de conteúdo de água (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 0,6 e 0,7 m³ m⁻³).

Para cada aumento na umidade, a combinação água-substrato era vigorosamente homogeneizada e um sensor de cada vez era inserido no recipiente para coletar dados, sem mover o substrato e tentando evitar alterações de ρ (este passo foi repetido para o conjunto de sensores avaliados). Além disso, destaca-se que, para cada nível de umidade, o substrato sempre foi seco nas mesmas condições mencionadas acima, sendo determinado θ a partir da diferença de água no início e no final do teste. Abordagem semelhante para calibração de substratos é descrita na literatura (FARES et al., 2016; NAGAHAGE et al., 2019). Portanto, uma equação linear empírica foi ajustada para cada um dos substratos avaliados por correlação entre os valores medidos de θ e os valores médios de saída de tensão de todos os sensores.

3.5 Análise de dados

Valores de θ obtidos experimentalmente para cada substrato (ou seja, valores de referência – θ_R) foram comparados com os valores estimados pelas Eqs. (1) e (2), e com aqueles estimados pelas equações de calibração (θ_{EC}). O desempenho das equações foi avaliado usando o indicador RMSE (Eq. 3) e o erro absoluto (ϵ – Eq. 4). O RMSE é um indicador comum para quantificar diferenças entre valores de referência e estimados em modelos (DURAN-ROS et al., 2010).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\theta_R - \theta_{est})^2}{n}} \quad (3)$$

$$\epsilon = |\theta_R - \theta_{est}| \quad (4)$$

em que, RMSE é o *Root Mean Squared Error* ($m^3 m^{-3}$), θ_R é a umidade volumétrica de referência ($m^3 m^{-3}$), θ_{est} é umidade volumétrica estimada pelo sensor ($m^3 m^{-3}$), ϵ é o erro absoluto ($m^3 m^{-3}$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as curvas de calibração ajustadas para cada um dos substratos avaliados.

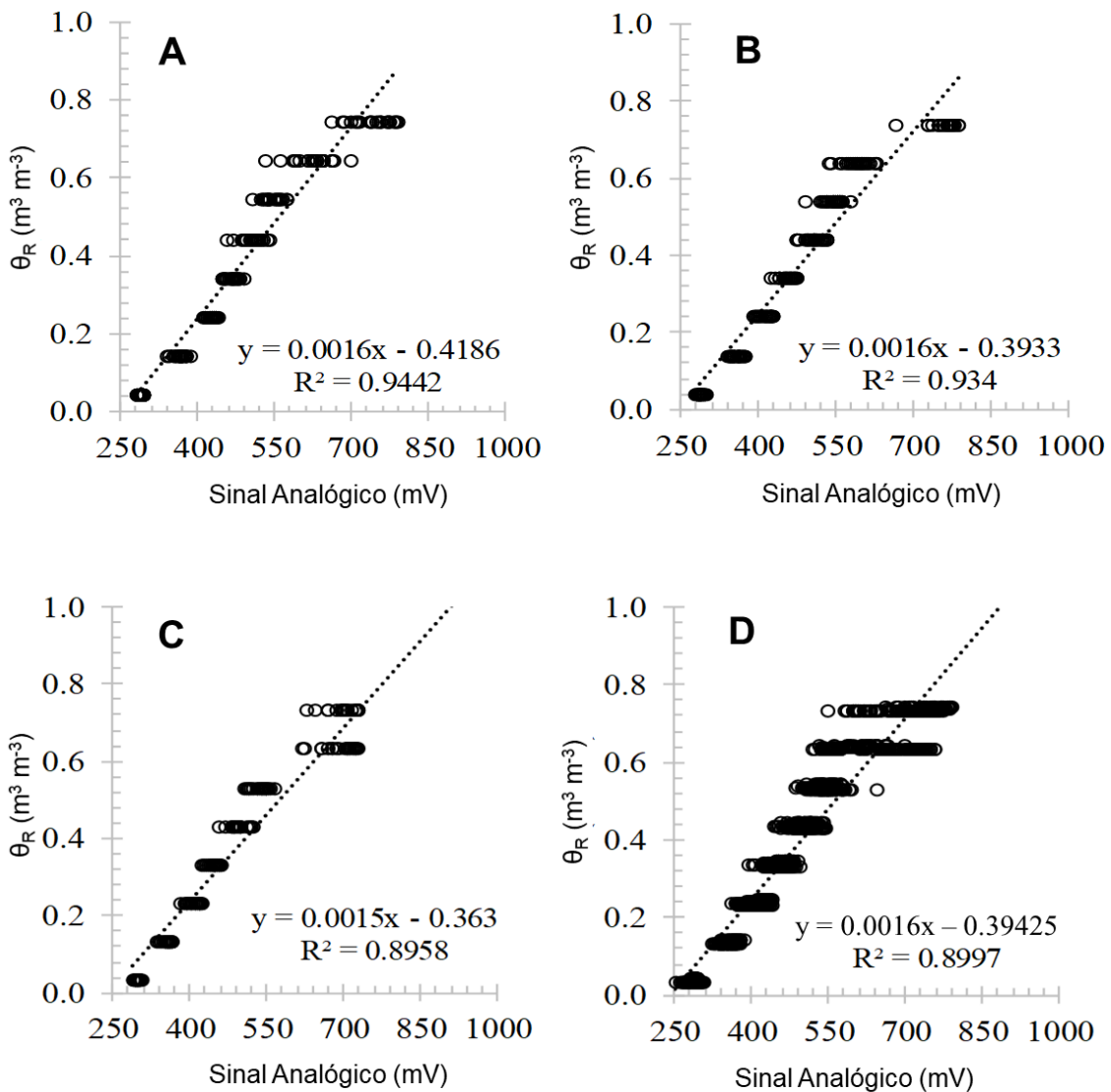


Figura 1. Curvas de calibração para os substratos cana-de-açúcar (A), citros (B), nativas (C) e compilação em uma única equação para os quatro tipos de substrato (D).

Para avaliar o desempenho das curvas de calibração obtidas experimentalmente em relação às equações fornecidas pelo fabricante, foi calculado o RMSE, o erro absoluto relativo para cada substrato (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados dos indicadores de qualidade RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e do erro absoluto ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para cada equação calibrada e equações fornecidas pelo fabricante para os substratos de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (SC), mudas de citros (SL), Nativas (SN) e todos os dados compilados.

Substrato	Equação	RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	ϵ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
Mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar (SC)	θ_{EC}	0,0541	0,0421
	θ_{E1}	0,0869	0,0672
	θ_{E2}	0,2206	0,2050
Mudas de citros (SL)	θ_{EC}	0,0588	0,0470
	θ_{E1}	0,0974	0,0791
	θ_{E2}	0,2236	0,2082
Nativa (SN)	θ_{EC}	0,0740	0,0507
	θ_{E1}	0,1153	0,0818
	θ_{E2}	0,2112	0,1959
Compilação de dados	θ_{EC}	0,0756	0,0552
	θ_{E1}	0,1097	0,0845
	θ_{E2}	0,2231	0,2061

* θ_{E1} e θ_{E2} são as umidades volumétricas estimadas pelas Eqs. (1) e (2), respectivamente. θ_{EC} são umidades volumétricas determinadas com a equação de calibração determinada experimentalmente nesta pesquisa.

Para todos os substratos avaliados observou-se que a equação do fabricante recomendada para substratos em várias salinidades (θ_{E1}) apresentou coeficiente angular da reta superior aos valores obtidos experimentalmente, sendo que isto proporciona baixo erro nas estimativas realizadas na faixa central de medição do sensor, mas acentua os erros nas estimativas tanto em valores baixos quanto elevados de umidades.

Os sensores capacitivos apresentaram uma resposta linear à variação da umidade do solo, obtendo-se um r^2 acima de 0,89 em todos modelos lineares calibrados (Figura 1). Esse comportamento linear foi observado por Payero et al. (2017) e Sena et al. (2020) quando avaliaram o EC-5 em diferentes texturas de solo.

As equações ajustadas para os substratos são bastante similares, sendo que uma única equação que poderia ser recomendada para esses substratos (Figura 1D). Esse resultado deriva das características gerais apresentadas na Tabela 1, o que confirma a relação de semelhança entre a composição e características dos substratos estudados, assim resultando em respostas análogas do sensor para os mesmos. Estudos mencionam que a granulometria do meio de cultivo está diretamente associada às respostas dos sensores frente à umidade real (PARVIN; DEGRÉ, 2015; ANDRADE JUNIOR et al., 2007; SILVA et al., 2012).

Conforme esperado, os valores de RMSE sempre foram menores ao utilizar-se os modelos calibrados. Ao comparar-se modelos para um dado conjunto de dados, quanto menor o valor de RMSE, melhor a qualidade de ajuste do modelo (MONTGOMERY; RUNGER, 2013).

As equações fornecidas pelo fabricante apresentaram maiores erros absolutos do que a equação obtida pela calibração conforme demonstrado na tabela 2. Os erros absolutos seguiram a mesma tendência para todos os substratos, sendo aproximadamente 5%, 8% e 20% para a equação calibrada, equação do fabricante referente substratos para vasos em várias salinidades (θ_{E1}) e equação do fabricante referente a solos minerais (θ_{E2}), respectivamente. Portanto, as equações calibradas do sensor EC-5 apresentaram uma redução de erro e uma maior precisão na determinação instantânea da umidade quando comparadas com a equação do fabricante indicada para substratos (θ_{E1}). A principal hipótese é que os substratos americanos utilizados para definir a equação do fabricante possuíam textura e estruturas diferentes dos substratos brasileiros. Essa diferença do meio pode ter ocasionado um maior erro, como observado por Mendes et al. (2014), no qual calibrou-se o sensor para um substrato de esterco de galinha e obteve-se uma redução na incerteza da estimativa do conteúdo de água de 30,8% para 7,1%.

Para obter a leitura em cada umidade de ensaio foi calculado a média e desvio padrão de 100 leituras, sendo que cada sensor foi programado para coletar 1 leitura por segundo. A Figura 2 representa o desvio-padrão amostral das leituras de umidade de cada sensor para o substrato cana-de-açúcar.

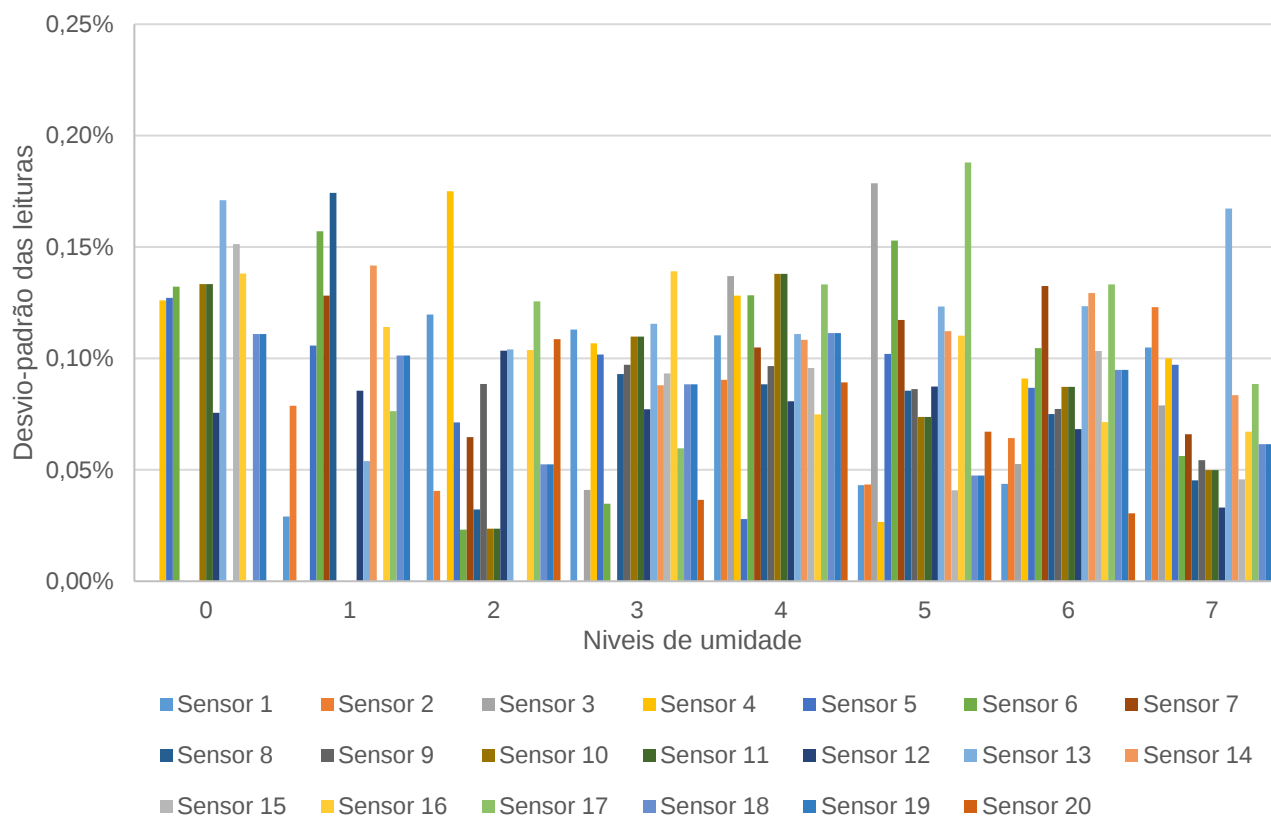


Figura 2. Desvio-padrão amostral das leituras de umidade de cada sensor para o substrato cana-de-açúcar.

Para dada condição de ensaio, todos os sensores avaliados apresentaram um desvio-padrão amostral inferior à 0,2%, evidenciando estabilidade nas leituras (Figura 2). Embora apresente apenas resultados do substrato de cana-de-açúcar, comportamento similar foi observado nos demais substratos estudados. A estabilidade nas leituras de umidade serve como indicador de desempenho e qualidade dos sensores.

Em etapas preliminares do estudo detectou-se variabilidade excessiva nas leituras de alguns sensores, sendo que estes foram diagnosticados como sensores defeituosos e eliminados do conjunto de sensores avaliados.

Apesar da qualidade e desempenho dos sensores, os resultados relatados no estudo de Junior (2018) demonstraram que a massa específica do solo influencia diretamente na calibração dos sensores, o que também foi observado durante o estudo em questão. Verificou-se que a posição do sensor em relação as paredes do recipiente influenciam significativamente nas leituras.

A temperatura pode modificar a resposta dos sensores baseados em propriedades dielétricas do meio, afetando a permissividade relativa da água, a condutividade elétrica do solo, a quantidade de água ligada à superfície do mineral. Componentes eletrônicos podem ser afetados por flutuações de temperatura. De acordo com o fabricante, a resposta do Decagon EC-5 à variação de temperatura é muito baixa.

5 CONCLUSÕES

- (1) A calibração dos sensores para o meio de cultivo de interesse é importante caso seja necessário determinar umidades volumétricas com exatidão.
- (2) Não há necessidade de calibração individual de vários sensores para cada meio de cultivo. A equação obtida ao calibrar apenas um sensor pode ser aplicada a outros sensores.
- (3) O sensor apresenta adequada estabilidade no sinal de resposta.
- (4) Uma única equação calibrada foi apropriada para os três tipos de substrato avaliados nesta pesquisa.

6 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.
- 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**, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.
- COBOS, D. R.; CHAMBERS, C. **Calibrating ECH₂O soil moisture sensors: Application note 2 - Decagon Devices**, 2010.
- CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília: ABID, n. 54, p. 46-55, 2002.
- DE BOODT, M.; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in floriculture. **Acta Horticulturae**, v. 26, p. 37-44, 1972.
- DRZAL, M. S.; KEITH CASSEL, D.; FONTENO, W. C. Pore fraction analysis: A new tool for substrate testing. In: **International Symposium on Growing Media and Hydroponics**. 1997. p. 43-54.
- DURAN-ROS, M.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; DE CARTAGENA F. R.; & PUIG-BARGUÉS J. Assessment of head loss equations developed with dimensional analysis for micro

- irrigation filters using effluents. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 4, p.521-526, 2010.
- FARES, A.; AWAL, R.; BAYABIL, H. Soil Water content sensor response to organic matter content under laboratory conditions. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1-11, 2016.
- FERMINO, M. H. **Métodos de análise para caracterização física de substratos para plantas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 89 p.
- FERRAREZI, R. S.; WEAVER, G. M.; VAN IERSEL, M. W.; TESTEZLAF, R. Subirrigation: Historical overview, challenges, and future prospects. **HortTechnology**, v. 25, n. 3, p. 262-276, 2015.
- FERRAREZI, R. S.; IERSEL, M. W. VAN; TESTEZLAF, R. Monitoring and controlling ebb-and-flow subirrigation with soil moisture sensors. **HortScience**, v. 50, n. 3, p. 447-453, 2015.
- FRANCESCA, V.; OSVALDO, F.; STEFANO, P.; PAOLA, R. P. Soil moisture measurements: A comparison of instrumentation performances. **Journal Irrigation Drainage Engineering**, v. 136, n. 2, p. 81-89, 2010.
- JUNIOR, E. J. A.; JÚNIOR, J. A.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo ec-5 em um Latossolo em função da densidade do solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 1, p. 80-88, 2018.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Seleção de sistemas de irrigação para hortaliças. Embrapa Hortaliças - Circular Técnica (INFOTECA-E)**. 1998. 22 p.
- MENDES, L. B.; LI, H.; XIN, H.; NASCIMENTO, J. W. B. Evaluation of EC-5 soil moisture sensors for real-time determination of poultry manure or litter moisture content. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 30, n. 2, p. 277-284, 2014.
- METERGROUP. **ECH₂O EC-5 Volumetric Water Content sensor (Datasheet)**. 2018.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 6 ed., Hoboken: Wiley, 2013.
- NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture Sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 2019.

- NEMALI, K. S; MONTESANO, F.; DOVE, S. K.; & VAN IERSEL, M. W. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH₂O and Theta probes. **Scientia Horticulturae**, v. 112, n. 2, p. 227-234, 2007.
- PARVIN, N.; DEGRÉ, A. Soil-specific calibration of capacitance sensors considering clay content and bulk density. **Soil Research**, v. 54, n. 1, p. 111-119, 2016.
- PAYERO, J.O.; QIAO, X.; KHALILIAN, A.; MIRZAKHANI-NAFCHI, A.; DAVIS, R. Evaluating the effect of soil texture on the response of three types of sensors used to monitor soil water status. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 9, n. 6, p. 566-577, 2017.
- ROUPHAEL, Y.; CARDARELLI, M.; REA, E.; BATTISTELLI, A.; COLLA, G. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation systems for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions. **Agricultural Water Management**, v. 82, n. 1-2, p. 99-117, 2006.
- SANTOS, F. J. S.; MIRANDA, F. R.; OLIVEIRA, V. H.; SAUNDERS, L. C. V. **Irrigação localizada (microirrigação)**. Embrapa Agroindústria Tropical-Documentos (INFOTECA-E), 1997. 48p.
- SENA, C. C. R. S.; JUNIOR, J. A.; DOMINGOS, M. V. H.; JUNIOR, E. D. J. A.; BATTISTI, R.; EVANGELISTA, A. W. P; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo/Calibration of the EC-5 capacitive soil moisture sensor in response to soil granulometry. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 17228-17240, 2020.
- SCHMAL, J. L., DUMROESE, R. K., DAVIS, A. S., PINTO, J. R., JACOBS, D. F. Subirrigation for production of native plants in nurseries: concepts, current knowledge, and implementation. **Native Plants**, v. 12, n. 2, p. 81-93, 2011.
- SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; SILVA JÚNIOR, J.J.; COLOMBO, A.; LIMA, J.M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.2, p.277-286, 2012.
- TEXAS INSTRUMENTS. **ADS1115 Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator (Datasheet)**. 2018.
- WALLACH, R. **Physical characteristics of soilless media**. In: Soilless Culture. Elsevier, 2019. p.33-112.