

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

Desenvolvimento e Avaliação de um Sensor
Capacitivo de Umidade do Solo e de Mini-Lisímetro
de Pesagem para Automação de Sistemas de
Irrigação

Gabriela Rodrigues da Costa

2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR CAPACITIVO
DE UMIDADE DO SOLO E DE MINI-LISÍMETRO DE PESAGEM
PARA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO**

GABRIELA RODRIGUES DA COSTA

Sob a Orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho

E Coorientação do Professor
Marinaldo Ferreira Pinto

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia -Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Outubro, 2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C837d	<p>Costa, Gabriela Rodrigues da, 1987- Desenvolvimento e avaliação de um sensor capacitivo de umidade do solo e de mini-lisímetro de pesagem para automação de sistemas de irrigação / Gabriela Rodrigues da Costa. – Seropédica, 2022. 46 f.: il.</p> <p>Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho. Dissertação (Mestrado). – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2022.</p> <p>1. Manejo da irrigação. 2. Permissividade elétrica. 3. Capacitância. 4. Evapotranspiração. 5. Lisimetria de pesagem. I. Carvalho, Daniel Fonseca de, 1968-, orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agronomia - Ciência do Solo. III. Título.</p>
-------	--

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)**



**HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 62 / 2022 - CPGACS
(12.28.01.00.00.00.27)**

Nº do Protocolo: 23083.066939/2022-83

Seropédica-RJ, 27 de outubro de 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO

GABRIELA RODRIGUES DA COSTA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/10/2022.

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ

(Orientador)

Leonardo Duarte Batista da Silva. Dr. UFRRJ

Carlos Rodrigues Pereira. Dr. UFF

(Assinado digitalmente em 01/11/2022 09:34)

DANIEL FONSECA DE CARVALHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: 1224578

(Assinado digitalmente em 28/10/2022 14:27)

LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: 2353141

(Assinado digitalmente em 29/10/2022 16:14)

CARLOS RODRIGUES PEREIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 655.031.126-87

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **62**, ano: **2022**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **27/10/2022** e o código de verificação: **7a9c2370d0**

*Educação não transforma o mundo.
Educação muda as pessoas.
Pessoas transformam o mundo.*

(Paulo Freire)

DEDICATÓRIA

A meus pais:

Ana Adalgisa de Carvalho da Silva Xavier e Luiz Carlos Rodrigues da Costa

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda força e sabedoria, minha fé nunca duvidou da Tua presença em minha vida.

Aos meus pais, por todo apoio e amor em toda minha vida. Essa vitória é para vocês e por vocês.

Aos meus orientadores, Daniel Fonseca de Carvalho e Marinaldo Ferreira Pinto, minha admiração e eterna gratidão por toda orientação.

Aos professores: Henderson Wanderley, Nivaldo Schutz, Juliana Lobo Paes e Conan Ayade Salvador, obrigada por todo suporte, carinho e amizade.

Aos professores: Erika Machado, Nivaldo Schutz, Henrique Vieira de Mendonça e Leonardo Duarte Batista que cederam laboratório e instrumentos para o desenvolvimento deste trabalho.

Para todos os amigos do alojamento da pós-graduação, que foram minha família e rede de apoio durante o período mais difícil do mestrado. Obrigada por tornar a jornada mais leve.

Ao grupo GPASSA por todo apoio e ajuda no desenvolvimento deste trabalho, sem vocês nada disso seria possível.

Aos amigos: Amanda, Bruno Barba, Ivo, Pietro, Ednaldo, Thiago, Michel, Celita, Mariana, Kellis, Ana Rafaela, Maria Clara, Guilherme, Vanessa, Joabe, João Felício, Isabel, Eliene, Laiza, Marcelo, Thalissa, Carol e Eduardo que nunca soltaram minha mão e tornaram o caminho mais leve.

Aos parceiros de laboratório: Joana e Miguelzinho, os mini cientistas que alegravam as tardes de trabalho.

Ao programa de pós-graduação por ter me concedido a oportunidade de integrar esse time de profissionais;

Aos órgãos de fomento: CAPES, FAPERJ e CNPq pelo financiamento da minha dissertação.

RESUMO GERAL

COSTA, Gabriela Rodrigues da. **Desenvolvimento e avaliação de um sensor capacitivo de umidade do solo e de mini-lisímetro de pesagem para automação de sistemas de irrigação.** 2022. 46 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

O uso eficiente da água na agricultura é alcançado mediante o emprego de técnicas de manejo da irrigação, que consiste na aplicação de água em quantidade suficiente para atender a necessidade hídrica durante o ciclo de desenvolvimento das plantas. O monitoramento do conteúdo de água no solo e da necessidade hídrica das culturas em tempo real por meio de dispositivos eletrônicos permite a otimização do sistema de irrigação, com aplicação da água em quantidade e momento adequados. Diante deste contexto, neste trabalho foram desenvolvidos e avaliados: a) um sensor capacitivo de baixo custo para medição da umidade do solo em diferentes materiais de solo/substrato; e b) um mini-lisímetro (ML) de pesagem visando a automação do sistema de irrigação e a determinação da necessidade hídrica de mudas de espécies arbóreas em estágio inicial de crescimento. Para o sensor capacitivo foram avaliados dois tipos de geometria (placas paralelas e coplanar) em diferentes tipos de placas de circuito impresso e materiais isolantes. Após avaliação inicial, o sensor coplanar construído em placa de fibra de vidro e isolado com verniz (CPS) apresentou maior sensibilidade na estimativa da umidade do solo, além de maior facilidade construtiva. O CPS foi avaliado e comparado ao sensor comercial (SC) 5TE da Decagon Devices, utilizando vasos de 3,0 L preenchidos com biossólido puro e 3 materiais de solo de diferentes texturas, que inicialmente apresentavam umidade próxima à capacidade de campo. As medidas de umidade volumétrica (θ) obtidas em balanças de precisão foram comparadas às leituras dos sensores, sendo gerados modelos relacionando θ com período (CPS) e permissividade (SC). Posteriormente, valores de θ estimados foram comparados a valores de θ medidos por pesagem e avaliados pelos índices de Willmoth (d), coeficiente de determinação (R^2) e índice de desempenho (c). O ML foi construído em madeira e com capacidade para receber uma bandeja de 54 tubetes de 280 cm³. A estrutura é dotada de uma célula de carga com capacidade nominal de 10 kg. Utilizando uma placa Arduino Mega, as variações de massa do conjunto eram registradas em um micro cartão SD, que por meio de um algoritmo permitia o manejo automatizado da irrigação. Dois MLs foram construídos, possibilitando a determinação da necessidade hídrica de mudas de *Dalbergia Nigra* (JB) e *Enterolobium contortisiliquum* (OM) em fase inicial de crescimento. O CPS apresentou ótimo desempenho ($c > 0,93$) ao estimar a umidade nas diferentes condições avaliadas, tendo melhores resultados que o SC em substrato com biossólido (lodo de esgoto). Após calibração, os MLs apresentaram sensibilidade adequada, com erro absoluto e erro quadrático médio inferiores a 1% da massa total, possibilitando o controle efetivo da irrigação. Ao longo do período de crescimento, foram aplicados 1,47 L muda⁻¹ de JB e 1,45 L muda⁻¹ de OM, que atingiram aos 89 dias após emergência, altura e diâmetro do coleto de, respectivamente, 39,2 cm e 3,4 mm, e 19,3 cm e 4,6 mm.

Palavras-chave: Manejo da irrigação. Permissividade elétrica. Capacitância. Evapotranspiração. Lisimetria de pesagem. Espécies arbóreas.

GENERAL ABSTRACT

COSTA, Gabriela Rodrigues. **Development and evaluation of a capacitive soil moisture sensor and weighing mini-lysimeter for automation of irrigation systems**. 2022. 46 p. Dissertation (Master in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

The efficient use of water in agriculture is achieved through the use of irrigation management techniques, which consists of applying water in sufficient quantity to meet the water requirement during the plant development cycle. Monitoring the soil water content and the water requirements of crops in real time through electronic devices allows the optimization of the irrigation system, with application of water in adequate amounts and at the right time. Given this context, in this study were developed and evaluated: a) a low-cost capacitive sensor for measuring soil moisture in different soil/substrate materials; and b) a weighing mini-lysimeter (ML) aimed at automating the irrigation system and determining the water requirement of seedlings of tree species in the initial stage of growth. For the capacitive sensor, two types of geometry (parallel and coplanar boards) were evaluated in different types of printed circuit boards and insulating materials. After initial evaluation, the coplanar sensor built in fiberglass plate and insulated with varnish (CPS) showed greater sensitivity in the estimation of soil moisture, in addition to greater ease of construction. The CPS was evaluated and compared to the commercial sensor (CS) 5TE from Decagon Devices, using 3.0 L pots filled with pure biosolid and 3 soil materials of different textures, which initially presented moisture close to field capacity. The volumetric moisture measurements (θ) obtained on precision balances were compared to the sensor readings, generating models relating θ with period (CPS) and permittivity (CS). Subsequently, estimated θ values were compared to θ values measured by weighing and evaluated by the Willmorth index (d), coefficient of determination (R^2) and performance index (c). The ML was built in wood and capable of receiving a tray of 54 tubes of 280 cm³. The structure is equipped with a load cell with a nominal capacity of 10 kg. Using an Arduino Mega board, the mass variations of the set were recorded on a micro-SD card, which through an algorithm allowed the automated management of irrigation. Two MLs were built, making it possible to determine the water requirement of seedlings of *Dalbergia Nigra* (JB) and *Enterolobium contortisiliquum* (OM) in the initial phase of growth. The CPS presented excellent performance ($c > 0.93$) when estimating the water content in the different conditions evaluated, having better results than the CS in substrate with biosolid (sewage sludge). After calibration, the MLs showed adequate sensitivity, with absolute error and mean square error of less than 1% of the total mass, enabling effective irrigation control. During the growth period, 1.47 L seedling⁻¹ of JB and 1.45 L seedling⁻¹ of OM were applied, which reached 89 days after emergence, height and collar diameter of, respectively, 39.2 cm and 3.4 mm, and 19.3 cm and 4.6 mm.

Keywords: Irrigation management. Electrical permittivity. Capacitance. Evapotranspiration. Weighing lysimetry. Tree species.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desenho esquemático dos sensores capacitivos do tipo coplanar (A) e de placas paralelas (B).....	6
Figura 2. Sensor coplanar em fibra de vidro (A) e sensor de placas paralelas com placa porosa e revestimento com tubo termo retrátil: vista lateral (B) e frontal (C).	7
Figura 3. Imagem do oscilador TLC 555 (A) e configuração do modo estável do oscilador (B). (Fonte: Texas Instruments).	7
Figura 4. Sinal de saída esperado após modulação do pulso em torno de 50-60% (A) e modelo de osciloscópio utilizado (B). (Fonte: Texas Instruments).	8
Figura 5. Molde de silicone construído (A) e sensor coplanar com isolamento à base verniz e encapsulamento do circuito elétrico por resina (B).	8
Figura 6. Sensores capacitivos inseridos nas colunas de solo: SCP em fibra de vidro (A) e fenolite (B), e SPP em fenolite (C).	9
Figura 7. Vasos com substrato no processo de saturação por 24 h.	12
Figura 8. Esquema de coleta de dados dos sensores em laboratório: balança de precisão (A), vaso com o sensor comercial 5TE (B), vaso com o sensor desenvolvido (C), balança desenvolvida para calibração do sensor desenvolvido (D), módulo de cartão de memória para armazenamento dos dados coletados pela balança e pelo sensor desenvolvido (E)..	13
Figura 9. Balanças desenvolvidas para a avaliação dos sensores de umidade: vistas, superior (A) e frontal (B), célula de carga de 5 kg utilizada (C) e módulo HX-711 (D).	14
Figura 10. Análise de correlação entre os valores de umidade determinados (θ_d) e estimados (θ_e) pelos modelos ajustados com o uso do sensor desenvolvido (SCP) e comercial (SC), para o bio sólido (A) e materiais de solo de textura arenosa (SI) (B), média (SII) (C) e argilosa (SIII) (D).	20
Figura 11. Sensibilidade do sensor desenvolvido ao aumento da condutividade elétrica (A) e temperatura (B) da água.....	22
Figura 12. Bandeja de mudas com para 56 tubetes (A) e estrutura do mini-lisímetro em madeira (B).	32
Figura 13. Módulo HX711.	33
Figura 14. Lógica de programação para automação da irrigação via lisimetria (Lucid App).	34
Figura 15. Mini-lisímetros com a malha de irrigação por gotejamento.	35
Figura 16. Bancada experimental com os mini-lisímetros coberta com lona plástica.	36
Figura 17. Valores de massa do conjunto medidos e registrados no HX711 para os mini-lisímetros automatizados com mudas de <i>Dalbergia nigra</i> (A) e <i>Enterolobium contortisiliquum</i> (B).	37
Figura 18. Massas de água aplicadas e acumuladas nas bandejas com 14 tubetes de <i>Dalbergia nigra</i> (A) e <i>Enterolobium contortisiliquum</i> (B).	38
Figura 19. Valores de temperatura (°C) e umidade relativa do ar em parte do período de crescimento e avaliação das mudas.	39
Figura 20. Crescimento em altura e diâmetro do coleto em função de dias após emergência e volume de água aplicado por tubete de <i>D. nigra</i> (A, C) e <i>E. contortisiliquum</i> (B, D).	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Leituras dos sinais dos sensores correspondentes à umidade do solo.....	10
Tabela 2. Composição granulométrica dos solos/substrato utilizados na calibração do sensor capacitivo.....	11
Tabela 3. Critérios de interpretação do índice de desempenho (c).	15
Tabela 4. Modelos ajustados entre valores de umidade volumétrica (y, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e período (x, em ms - SCP), e permissividade (x, em F m^{-1} - SC).	18
Tabela 5. Erro médio absoluto do maior quartil entre valores de umidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) obtidos pelos sensores desenvolvido (SCP) e comercial (SC), para os diferentes materiais de solo/substrato.....	22
Tabela 6. Preços dos componentes utilizados para desenvolver o sistema de irrigação automatizado.	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULO I DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR CAPACITIVO PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO.....	2
2.1 RESUMO.....	3
2.3 ABSTRACT.....	4
2.4 INTRODUÇÃO	5
2.5 MATERIAIS E MÉTODOS	6
2.5.1 Desenvolvimento do sensor	6
2.5.2 Leitura dos sensores	7
2.5.3 Encapsulamento do circuito eletrônico	8
2.5.4 Avaliação dos materiais utilizados no desenvolvimento dos sensores	8
2.5.5 Avaliação da sensibilidade dos sensores.....	9
2.5.6 Avaliação de desempenho do sensor desenvolvido em diferentes tipos de solo e substrato	10
2.5.7 Preparo das amostras.....	12
2.5.8 Ambiente de coleta de dados	13
2.5.9 Leitura e armazenamento de dados	13
2.5.10 Análise dos resultados.....	14
2.5.11 Avaliação de sensibilidade à salinidade.....	15
2.5.12 Avaliação do efeito da temperatura.....	16
2.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
2.6.1 Avaliação de desempenho dos sensores (SCP e SC) nos diferentes materiais de solo/substrato	17
2.6.2 Avaliação da sensibilidade à salinidade e temperatura	22
2.7 CONCLUSÕES	24
2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
3. CAPÍTULO II DESENVOLVIMENTO DE MINI-LISÍMETROS PARA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM VIVEIROS DE MUDAS FLORESTAIS	28
3.1 RESUMO.....	29
3.3 ABSTRACT.....	30
3.4 INTRODUÇÃO	31
3.5 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.5.1 Desenvolvimento e avaliação.....	32
3.5.2 Automação da irrigação	33
3.5.3 Necessidade hídrica de mudas de espécies arbóreas	35
3.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
3.6.1 Avaliação da precisão e exatidão do mini-lisímetro	37
3.6.2 Avaliação da necessidade hídrica das mudas nos lisímetros	37
3.6.3 Avaliação do desenvolvimento das mudas nos lisímetros	39
3.6.4 Análise de custos para o desenvolvimento do minilísímetro	41
3.7 CONCLUSÕES	42
3.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
4. CONCLUSÕES GERAIS	46

1. INTRODUÇÃO GERAL

A água é o principal fator limitante para a atividade agrícola e a manutenção da umidade do solo em níveis adequados garante a oxigenação no sistema radicular e o atendimento à demanda hídrica do vegetal sem afetar o seu desenvolvimento. Além disso, evita as irrigações excessivas, diminuindo a pressão sobre o uso de recursos hídricos na agricultura, que é a atividade econômica com maior demanda por água doce.

A irrigação possui papel importante na viabilidade da produção agrícola, sobretudo em regiões com alta insolação e baixo índice pluviométrico. Por outro lado, a ocorrência de estresse hídrico em áreas irrigadas pode afetar a produtividade das culturas, proporcionando perdas econômicas significativas. Neste sentido, a determinação da necessidade hídrica dos cultivos é fundamental para o manejo da água na agricultura irrigada, que pode ser realizado com o uso de lisímetros e de sensores de umidade do solo, dentre outras metodologias.

A lisimetria tem sido utilizada de maneira extensiva no fornecimento de dados para o desenvolvimento, calibração e validação de métodos de determinação da evapotranspiração e, consequentemente, da demanda hídrica das culturas nas diferentes fases de desenvolvimento. Por outro lado, o monitoramento do conteúdo de água no solo por meio de sensores fornece dados que podem ser utilizados no cálculo da lâmina de água a ser aplicada na irrigação.

Ambas as metodologias podem ser usadas na automatização de sistemas de irrigação ao serem conectadas a sistemas embarcados e/ou redes de internet, permitindo a determinação da necessidade hídrica das culturas em tempo real e, consequentemente, a aplicação de água no momento e na quantidade adequados, aumentando a eficiência da irrigação. Além disso, os sistemas automáticos podem apresentar baixo custo devido à popularização de placas para prototipagem de projetos eletrônicos como Arduino, *Raspberry* etc.

O uso de algoritmos permite a análise rápida dos dados gerados por sensores de umidade ou lisímetros acoplados a placas de prototipagem eletrônica, permitindo a tomada de decisão com rapidez e precisão. Deste modo, as plantas recebem água na quantidade e no momento adequados, levando à redução de custos com mão-de-obra, energia e volume de água utilizado, em comparação a sistemas convencionais de manejo da irrigação.

Diante do alto custo dos sensores comerciais de umidade do solo e da ausência de dados sobre demanda hídrica de espécies arbóreas, este trabalho é apresentado em dois capítulos, visando testar as hipóteses de que é possível desenvolver um sensor capacitivo de umidade do solo de baixo custo e um mini-lisímetro de pesagem capaz de determinar a necessidade hídrica e automatizar o sistema de irrigação para produção de mudas de espécies arbóreas.

A dissertação foi organizada em dois capítulos, de título: Capítulo I - Desenvolvimento e avaliação de um sensor capacitivo para determinação do conteúdo de água no solo, e Capítulo II - Desenvolvimento de mini-lisímetros para automação de sistemas de irrigação em viveiros de mudas florestais.

Os respectivos objetivos foram: Capítulo I - a) desenvolver e avaliar um sensor capacitivo para estimativa do conteúdo de água no solo, comparando seu desempenho a um sensor comercial em diferentes materiais de solo/substrato; Capítulo II: a) desenvolver e avaliar mini-lisímetros de pesagem visando automação do sistema de irrigação por meio de válvulas solenoides e sistema de controle e coleta de dados; b) determinar a necessidade hídrica e o crescimento inicial de mudas de espécies arbóreas da Mata Atlântica.

2. CAPÍTULO I

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR CAPACITIVO PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

2.1 RESUMO

O conteúdo de água no solo é uma importante variável no manejo da irrigação e pode ser determinado por meio de sensores eletrônicos de diferentes princípios de funcionamento, que de modo geral tem elevado custo de aquisição. O objetivo deste estudo foi desenvolver um sensor eletrônico capacitivo de baixo custo e avaliar o seu desempenho em biossólido e materiais de solo de diferentes texturas. Em uma avaliação inicial, o sensor coplanar (SCP) construído em placa de fibra de vidro e isolado com verniz apresentou maior sensibilidade na estimativa da umidade do solo, e maior facilidade construtiva. Na avaliação de desempenho, o SCP foi comparado ao sensor comercial 5TE da Decagon Devices (SC). As medidas de umidade volumétrica (θ) obtidas em balanças de precisão foram comparadas às leituras dos sensores, gerando modelos relacionando θ com período (SCP) e permissividade (SC). Os valores de θ estimados pelos modelos (θ_e) foram comparados aos valores medidos (θ_d) e avaliados por diferentes índices de desempenho. A sensibilidade do SCP foi ainda avaliada em água, quanto à salinidade e temperatura. O sensor desenvolvido apresentou desempenho satisfatório, apresentando pequeno erro na determinação do conteúdo de água no solo. O SCP apresentou baixa sensibilidade nas faixas de salinidade e temperatura da água normalmente observadas no perfil do solo.

Palavras-chave: Manejo da irrigação. Umidade do solo. Permissividade do solo.

2.3 ABSTRACT

Soil water content is an important variable in irrigation management and can be determined using electronic sensors with different operating principles, which generally have a high acquisition cost. The aim of this study was to develop a low-cost capacitive electronic sensor and evaluate its performance in biosolids and soil materials of different textures. In an initial evaluation, the coplanar sensor (SCP) built in fiberglass board and isolated with varnish showed greater sensitivity in estimating soil moisture, and easier construction. In the performance evaluation, the SCP was compared to the commercial 5TE sensor from Decagon Devices (SC). Volumetric humidity measurements (θ) obtained on precision scales were compared to sensor readings, generating models relating θ to period (SCP) and permittivity (SC). The θ values estimated by the models (θ_e) were compared to the measured values (θ_d) and evaluated by different performance indices. The sensitivity of the SCP was also evaluated in water, regarding salinity and temperature. The developed sensor presented satisfactory performance, presenting small error in the determination of the water content in the soil. The SCP showed low sensitivity in the ranges of salinity and water temperature normally observed in the soil profile.

Keywords: Irrigation management. Soil moisture. Soil permissiveness.

2.4 INTRODUÇÃO

O manejo da água em sistemas de irrigação consiste na determinação e no fornecimento da quantidade de água necessária ao pleno desenvolvimento dos cultivos, visando maximizar a produtividade ou a receita líquida. O conteúdo de água no solo é uma das variáveis mais importantes a serem monitoradas a fim de permitir o uso racional da água na agricultura (VORIES & SUDDUTH, 2021).

A água possui papel importante na solubilização e disponibilização dos nutrientes do solo para as plantas (VERMA & PAHUJA, 2021) e por isso, a ocorrência de períodos secos prolongados causa prejuízos ao desenvolvimento da cultura, por vezes levando à perda total da produção (ODUOR et al., 2021). Portanto, tecnologias que permitam o monitoramento da umidade do solo em tempo real contribuem para o manejo eficiente do balanço de água em sistemas de produção agrícola (YU et al., 2021).

Existem diferentes metodologias para quantificação do conteúdo de água no solo, destacando-se a tensiometria (GUAN & FREDLUND, 1997), a moderação de nêutrons (CHANASYK & NAETH, 1996), a reflectometria no domínio do tempo (TDR) (TOPP et al., 1980), a reflectometria no domínio da frequência (FDR) (DEAN et al., 1987), dentre outros. Ao contrário das sondas TDR, que possuem alto custo de aquisição (SONGARA & PATEL, 2022), inviabilizando seu uso na determinação da umidade de forma representativa em extensas áreas irrigadas, os sensores capacitivos (FDR) podem ser produzidos com facilidade em virtude da sua simplicidade construtiva e da eletrônica empregada. A FDR tem como princípio de funcionamento a variação da permissividade dielétrica do meio em resposta ao conteúdo de água (SHARMA et al., 2017), oferecendo simplicidade no manuseio para medições *in situ*.

O uso de sensores eletrônicos de umidade do solo é caminho para a automação, monitoramento de forma mais intensiva de sistemas de irrigação e obtenção de dados experimentais com maior nível de detalhamento, permitindo informação mais precisas e confiáveis. Principalmente quando ocorre a junção de tecnologias digitais que possibilitam a criação de ferramentas para a implementação da agricultura 4.0 (KAMIENSKI & VISOLI, 2018).

Diante do exposto, torna-se fundamental o domínio tecnológico da construção de sensores para o monitoramento da umidade do solo, e a expansão de tecnologias acessíveis para agricultura. Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um sensor capacitivo de baixo custo para determinação do conteúdo de água e comparar o seu desempenho a um sensor comercial em diferentes materiais de solo/substrato.

2.5 MATERIAIS E MÉTODOS

2.5.1 Desenvolvimento do sensor

O sensor capacitivo foi idealizado com 14 cm de comprimento e 3 cm de largura, sendo avaliadas inicialmente duas geometrias (placas paralelas-SPP e coplanar-SCP) em diferentes tipos de placas de circuito impresso e materiais isolantes. O SCP foi confeccionado em fibra de vidro e revestimento em verniz (Implastec), e em fenolite revestido com tubo termo retrátil. O SPP foi confeccionado apenas em fenolite, revestido com tubo termo retrátil. Para esse sensor, foi utilizada uma placa de material poroso como meio dielétrico, não permitindo a sua confecção com isolamento em verniz. O uso do material poroso como meio dielétrico no SPP em detrimento do solo (SCP) teve como objetivo eliminar interferências no sinal do sensor por características físicas e químicas do solo. As distâncias entre as placas dos capacitores nos sensores SCP e SPP foram, respectivamente, 1,0 e 17,0 mm.

O projeto inicial do circuito eletrônico dos sensores foi feito no software KiCad (KiCad, 2021) e impresso em papel fotográfico. O corte da placa de fenolite foi realizado nas mesmas dimensões do desenho (Figura 1), após sua aderência por prensa térmica. Em seguida, a placa foi mergulhada em solução de Percloreto de Ferro (FeCl_3) por 15 min para corrosão da superfície de cobre não coberta pelo desenho. Após a corrosão, as placas foram limpas com solução de álcool isopropílico para retirada de gorduras e sujidades.

O processo de isolamento dos sensores à base de verniz foi realizado por imersão e posterior exposição às condições do ambiente para secagem por 72 h. No isolamento com tubo termo retrátil, os eletrodos do sensor foram inseridos em um tubo com diâmetro de 20 mm, que se aderiu perfeitamente à placa do sensor com uso de um secador térmico (Figura 2).

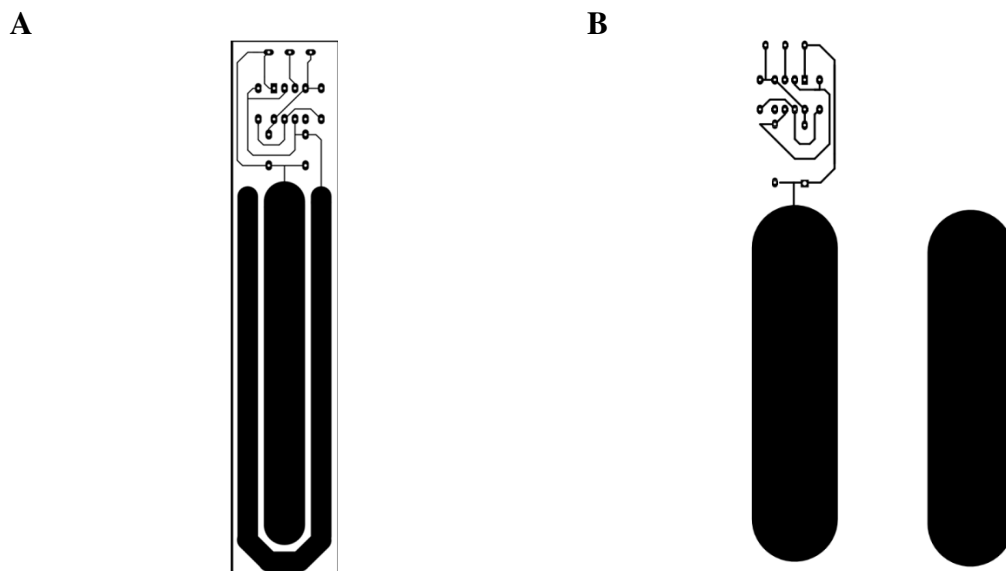


Figura 1. Desenho esquemático dos sensores capacitivos do tipo coplanar (A) e de placas paralelas (B).

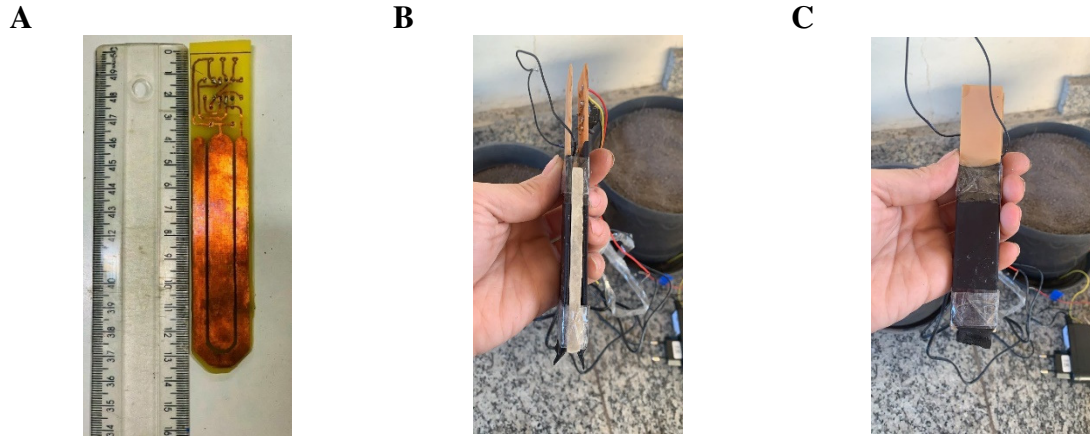


Figura 2. Sensor coplanar em fibra de vidro (A) e sensor de placas paralelas com placa porosa e revestimento com tubo termo retrátil: vista lateral (B) e frontal (C).

2.5.2 Leitura dos sensores

Após a etapa de isolamento, foi realizada a solda dos componentes do circuito eletrônico, sendo utilizado o oscilador TLC555 no modo estável para transformação da capacitância em frequência (kHz) (Figura 3).

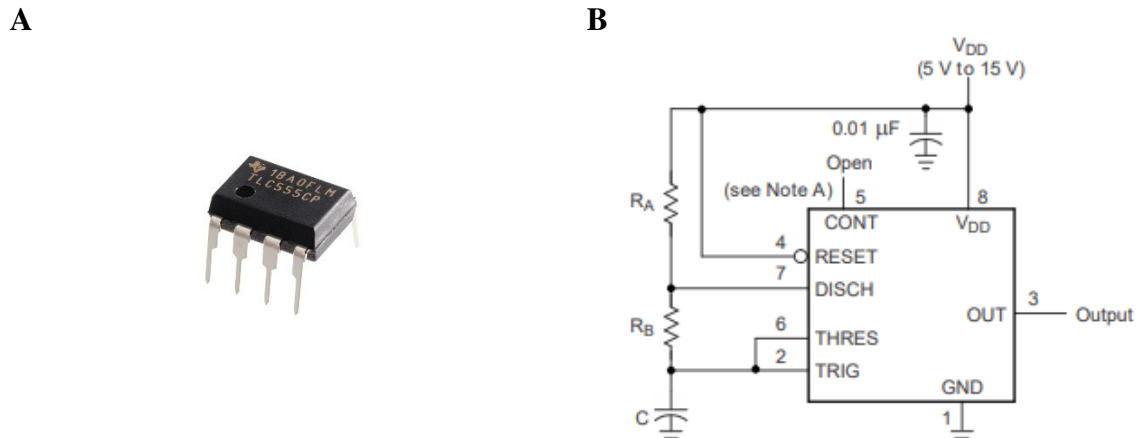


Figura 3. Imagem do oscilador TLC 555 (A) e configuração do modo estável do oscilador (B). (Fonte: Texas Instruments).

No circuito desenvolvido, a capacitância (C) sofre um condicionamento de sinal pelo oscilador, sendo transformado em um sinal pulsante (Figura 4 A) com a leitura em frequência (F). O sinal gerado pode ser calculado pela Equação 1 e visualizado em um osciloscópio (Figura 4B).

$$F = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (1)$$

Em que R é a leitura dos resistores A e B.

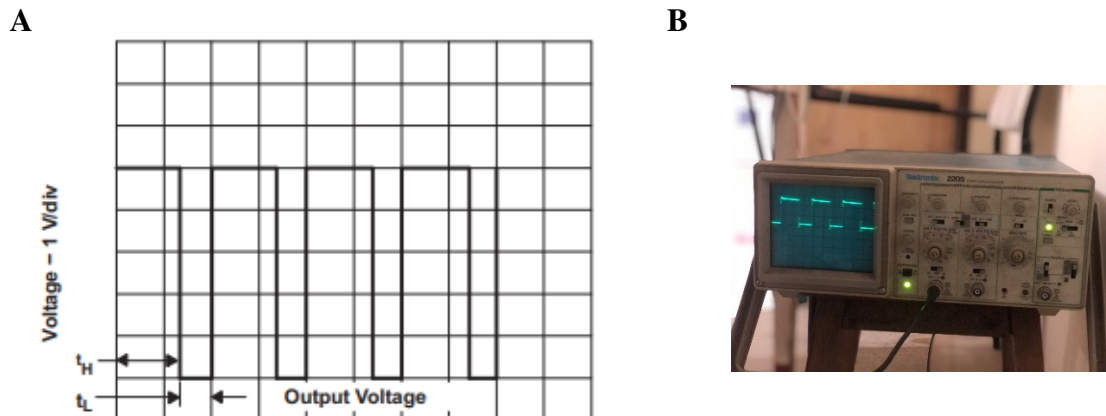


Figura 4. Sinal de saída esperado após modulação do pulso em torno de 50-60% (A) e modelo de osciloscópio utilizado (B). (Fonte: Texas Instruments).

2.5.3 Encapsulamento do circuito eletrônico

A proteção do circuito eletrônico de conversão do sinal de C foi realizada com resina epóxi preta (Redecenter, SQ-2119), que funciona como proteção física dos componentes eletrônicos à presença de umidade, água, solo e outros fatores ambientais que podem danificar o circuito. Utilizando moldes de silicone construídos com dimensão compatível para abrigar os componentes do sensor, o encapsulamento do circuito foi realizado utilizando resina epóxi e endurecedor (Redecenter, 3154) na proporção 3:1, que ofereceu boa resistência e acabamento (Figura 5).

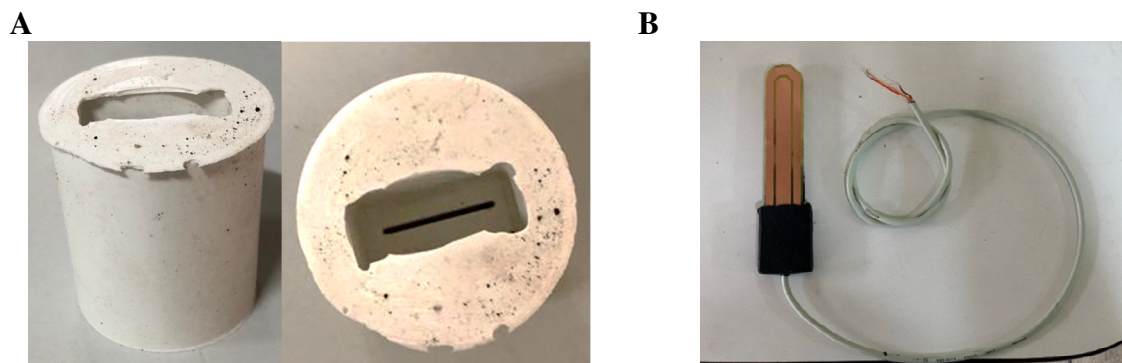


Figura 5. Molde de silicone construído (A) e sensor coplanar com isolamento à base verniz e encapsulamento do circuito elétrico por resina (B).

2.5.4 Avaliação dos materiais utilizados no desenvolvimento dos sensores

O primeiro teste foi realizado nos sensores de geometria coplanar, que foram perfurados para soldagem de fios com o objetivo de medir a resistência entre as placas do capacitor e a variação do sinal de capacitância em função das características do meio adjacente. Para isso, o sensor foi imerso em um recipiente com água a fim de avaliar a eficiência do isolamento e a sensibilidade das placas do capacitor às variações de umidade do meio adjacente.

2.5.5 Avaliação da sensibilidade dos sensores

Para a avaliação dos sensores, colunas de solo foram construídas em tubo de PVC de 100 mm (diâmetro nominal) e altura de 150,0 mm, perfazendo um volume útil de 2,0 L, que foram preenchidas com material de solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (Figura 6).

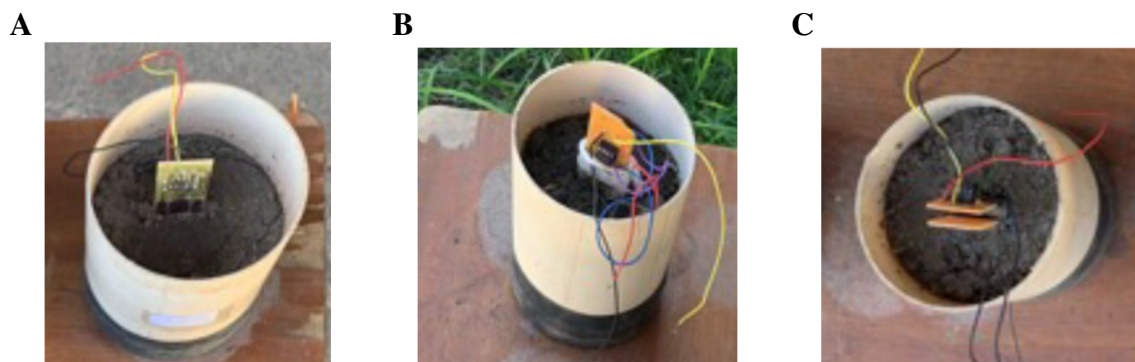


Figura 6. Sensores capacitivos inseridos nas colunas de solo: SCP em fibra de vidro (A) e fenolite (B), e SPP em fenolite (C).

As colunas foram tampadas na parte inferior com tela mosquiteiro e após preenchidas foram colocadas para saturar por 48 h em recipiente contendo água até a metade da altura, e cobertas com papel para evitar a evaporação. Segundo Sophocleous et al. (2020), o processo de saturação de baixo para cima evita que bolhas de ar fiquem retidas na massa de solo, possibilitando que o processo de umedecimento do solo ocorra sem aeração, atingindo valores próximos a 100%. Os sensores foram inseridos nas colunas de solo na posição vertical e antes do processo de saturação.

No período de 15/06/2021 a 16/07/2021, e nos horários das 07:30 h, 12:00 h e 18:00 h, foram coletados os sinais dos sensores, utilizando multímetro com leitura de frequência, e realizadas leituras de massa do conjunto (coluna de solo + sensor) em balança de precisão. As colunas de solo foram expostas ao sol durante o período do teste para acelerar o processo de evaporação. A umidade volumétrica das colunas de solo foi determinada pelo produto da umidade gravimétrica pela densidade do solo, previamente determinada.

No material de fenolite, as placas do capacitor para ambas as geometrias (SCP e SPP) e com isolamento em verniz conduziam cargas entre elas após alguns ciclos de imersão em água e secagem, comprometendo o seu funcionamento. Este resultado é explicado pela constituição desse material, confeccionado com papel impregnado e resina. Com o tempo, o material absorve água e compromete a resistência à passagem de cargas entre as placas do capacitor, sendo considerado impróprio para o desenvolvimento de sensores com este tipo de isolamento. O mesmo teste foi realizado no SCP confeccionado em placa de fibra de vidro, cujo processo de fabricação foi o mesmo que o realizado na placa de fenolite. O sinal de saída observado no multímetro mostrou que a resistência entre as placas do capacitor era infinita, ou seja, não havia condução de cargas, indicando que o tipo de material utilizado e o isolamento com verniz apresentaram resultados satisfatórios.

A sensibilidade dos sensores desenvolvidos foi calculada pela relação entre as variações da umidade volumétrica do solo e do sinal de frequência. O SCP desenvolvido em fibra vidro e com isolamento e proteção anticorrosiva a base de verniz apresentou sensibilidade na leitura de 0,1% de umidade a cada variação de frequência de 1 kHz. No SCP desenvolvido em fenolite, com isolamento e proteção anticorrosiva em tubo termo retrátil, a sensibilidade foi de 0,2% (Tabela 1). O SPP também apresentou sensibilidade de 0,1%. Em todos os sensores avaliados o erro padrão foi 0,01%.

Tabela 1. Leituras dos sinais dos sensores correspondentes à umidade do solo.

C1		C2		C3	
F (KHz)	θ (cm ³ cm ⁻³)	F (KHz)	θ (cm ³ cm ⁻³)	F (KHz)	θ (cm ³ cm ⁻³)
86	0,163	166	0,156	84	0,171
135	0,131	181	0,124	93	0,145
132	0,126	180	0,119	95	0,139
154	0,117	190	0,109	114	0,127
164	0,109	195	0,102	131	0,116
161	0,108	200	0,100	142	0,113
180	0,104	196	0,096	145	0,108
180	0,099	203	0,091	154	0,101
178	0,095	202	0,087	162	0,096
200	0,093	210	0,085	172	0,093
190	0,091	212	0,082	182	0,090
S = 0,1%		S = 0,2%		S = 0,1%	

C1- Sensor coplanar com verniz; C2 - Sensor coplanar com verniz; C3 - Sensor coplanar com verniz; C4 - Sensor coplanar com Tubo termo retrátil; C5 - Sensor de placas paralelas com tubo termo retrátil

Os sensores revestidos com tubo termo retrátil apresentaram os maiores valores iniciais de frequência (C2), e menor amplitude na variação do sinal de frequência (C3), indicando perda de sensibilidade por esse tipo de proteção anticorrosiva e, conseqüentemente, subestimativa dos valores de umidade do solo. O sensor isolado com verniz apresentou maior sensibilidade à variação de umidade do solo, com menores valores iniciais de frequência. Essa característica pode ser confirmada pela amplitude dos valores de F entre o solo na condição de capacidade de campo e no último dia de medição, quando não ocorria variação expressiva da umidade na coluna de solo (Tabela 1).

2.5.6 Avaliação de desempenho do sensor desenvolvido em diferentes tipos de solo e substrato

O processo de avaliação do sensor foi realizado em 2 etapas: calibração do sensor coplanar desenvolvido em fibra de vidro e isolamento em verniz (SCP) em diferentes materiais de solo/substrato; e comparação do desempenho e da exatidão do mesmo com o sensor 5TE (SC) (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, USA) na determinação do conteúdo de água.

Os sensores foram avaliados em 4 tipos de materiais de solo/substrato para plantas: biossólido (lodo de esgoto estabilizado), textura arenosa proveniente do horizonte superficial de um Argissolo Vermelho Amarelo (SI), textura média de um horizonte de transição de um Argissolo Amarelo (SII), textura argilosa proveniente do horizonte Bt de um Argissolo Vermelho (SIII), coletados no campus da UFRJ. A composição granulométrica dos materiais está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição granulométrica dos solos/substrato utilizados na calibração do sensor capacitivo.

Materiais de solo/susbrato	Areia total (%)	Silte (%)	Argila (%)	θr	θs	α	n	m	θcc
	(0,05 a 2 mm)	(0,002 a 0,05 mm)	(< 0,002 mm)	(cm³ cm⁻³)					(cm³ cm⁻³)
Biossolido	76,1	23,9	-	0,31	0,81	0,0874	1,537	0,999	0,2127
Solo I (SI)	83,0	4,0	13,0	0,07	0,41	0,0217	1,221	0,999	0,1683
Solo II (SII)	57,0	9,0	34,0	0,22	0,51	0,0247	2,024	0,999	0,2744
Solo III (SIII)	31,0	23,0	46,0	0,28	0,65	0,0689	2,595	0,999	0,2806

As curvas de retenção de água nos materiais, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (Tabela 1) foram determinadas pelo método simplificado da evaporação, utilizando o equipamento comercial Hyprop® (PERTASSEK et al., 2015). Esse dispositivo avalia o conteúdo de água no material em equilíbrio com um potencial matricial de até -80 kPa, aproximadamente, que corresponde à faixa de umidade do solo esperada para a maioria dos cultivos agrícolas (ROTIMI OJO et al., 2015).

Para a calibração e comparação dos sensores desenvolvidos foram utilizados, para cada tipo de solo/substrato, 10 vasos com capacidade de 3,0 L, preenchidos com 2,0 L de material peneirado e seco em estufa por 48 h a 105 °C. O volume de material foi determinado por proveta graduada, e as massas dos vasos preenchidos foram obtidas por meio de balança de precisão. Em seguida, os vasos foram colocados para saturação por 24 h.

Após o período de saturação, os vasos foram retirados da bandeja para que o excesso de água fosse drenado e os materiais atingissem, aproximadamente, a condição de capacidade de campo. Após instalação dos sensores nos vasos, na posição vertical, iniciaram-se as coletas de informação, sendo utilizados 5 vasos para o SCP e 5 para o SC. Optou-se por não avaliar os sensores simultaneamente no mesmo vaso para evitar influência dos sinais de um em relação ao outro.

2.5.7 Preparo das amostras

Para a calibração e comparação dos sensores desenvolvidos foram utilizados, para cada tipo de solo/substrato, 10 vasos com capacidade de 3,0 L, preenchidos com 2,0 L de material peneirado e seco em estufa por 48 h a 105 °C. O volume de material foi determinado por proveta graduada, e as massas dos vasos preenchidos foram obtidas por meio de balança de precisão. Em seguida, os vasos foram colocados para saturação por 24 h (Figura 7).



Figura 7. Vasos com substrato no processo de saturação por 24 h.

Após o período de saturação, os vasos foram retirados da bandeja para que o excesso de água fosse drenado e os materiais atingissem, aproximadamente, a condição de capacidade de campo. Após instalação dos sensores nos vasos, na posição vertical, iniciaram-se as coletas de informação, sendo utilizados 5 vasos para o SD e 5 para o SC 5TE. Optou-se por não avaliar os sensores simultaneamente no mesmo vaso para evitar influência dos sinais de um em relação ao outro.

2.5.8 Ambiente de coleta de dados

As medidas dos sinais dos sensores foram realizadas em ambiente climatizado e os vasos ficaram sob iluminação constante de lâmpadas halógenas com o objetivo de acelerar a evaporação de água nos materiais de solo/substrato (Figura 8). Além do aumento da temperatura do ar na superfície, a variação do conteúdo de água nos vasos foi também influenciada pela baixa umidade relativa imposta pela climatização do ambiente.

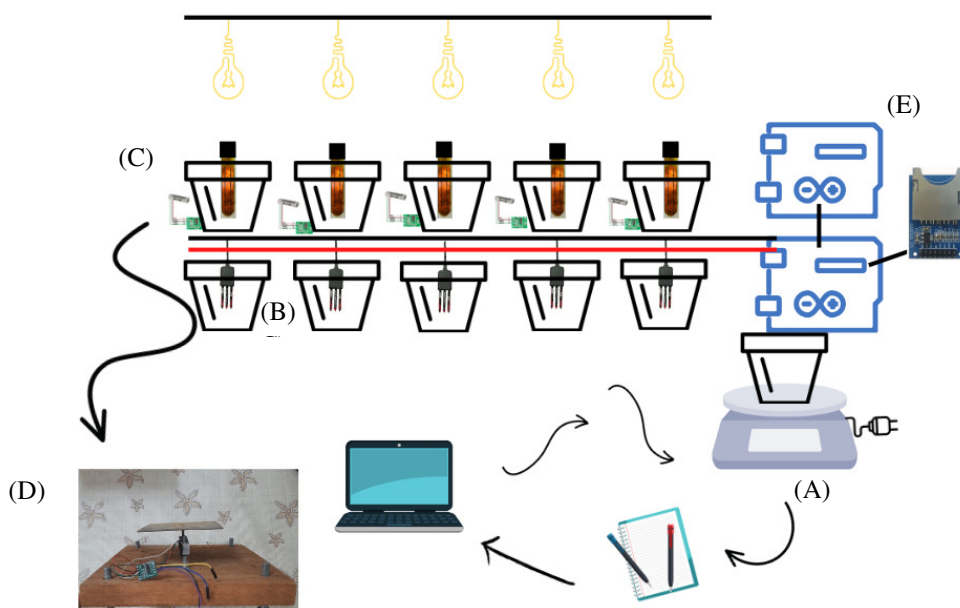


Figura 8. Esquema de coleta de dados dos sensores em laboratório: balança de precisão (A), vaso com o sensor comercial 5TE (B), vaso com o sensor desenvolvido (C), balança desenvolvida para calibração do sensor desenvolvido (D), módulo de cartão de memória para armazenamento dos dados coletados pela balança e pelo sensor desenvolvido (E).

2.5.9 Leitura e armazenamento de dados

As leituras de massa dos conjuntos contendo o SCP foram obtidas por meio de balanças construídas com célula de carga de capacidade para 5,0 kg (Figura 9), enquanto nos vasos com o SC foi utilizada balança de precisão comercial (Marte AD 5002). As balanças para avaliação do SCP foram construídas com o objetivo de otimizar a coleta de dados e obter maior quantidade de leituras do sensor, permitindo a detecção da variação da massa do conjunto em função da evaporação da água dos materiais de solo/substrato durante o processo de secagem.

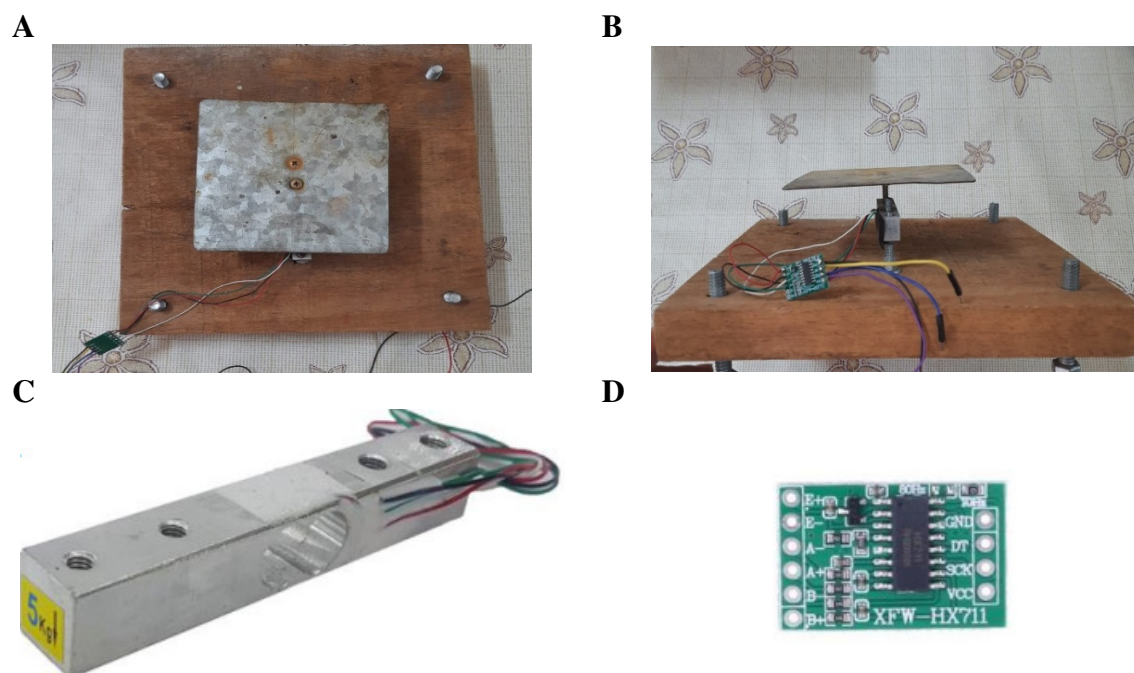


Figura 9. Balanças desenvolvidas para a avaliação dos sensores de umidade: vistas, superior (A) e frontal (B), célula de carga de 5 kg utilizada (C) e módulo HX-711 (D).

A definição do peso zero das balanças foi realizada de maneira digital, seguindo a programação recomendada pelo fabricante. Em seguida, foi realizada a calibração da balança, por meio de 5 ciclos de carregamento e descarregamento de massas conhecidas (75 g) sobre os vasos, possibilitando calcular a massa do conjunto em resposta à variação de sinal da célula de carga. O valor estimado pelo módulo foi relacionado à massa real adicionada para obtenção da curva de calibração. Ao final do processo de calibração foi ajustado um modelo linear, por análise de regressão, relacionando a massa real adicionada e a massa estimada pelo módulo, resultando em um desvio padrão médio de 0,66 g e R^2 de 0,9998.

A coleta de dados foi realizada no período de 20/12/2021 a 13/05/2022, para os 4 tipos de materiais de solo/substrato. As leituras do sinal fornecido pelo SCP (frequência) foram realizadas até que a massa dos vasos sobre as balanças não apresentasse variações expressivas. Para a coleta e armazenamento dos dados do sinal foram utilizados 2 microcontroladores Arduino Mega 2560 (Arduino INC., 2022), que foram utilizados para coleta de dados (principal) e leituras dos sensores (secundário). As células de carga das balanças eram ligadas individualmente ao módulo de amplificação de sinal HX-711 (Figura 9D), permitindo a comunicação com o microcontrolador principal, que permitia o armazenamento de dados em um micro cartão SD utilizando o modulo SPI (SHARMA et al., 2017), gerando um arquivo no formato texto (txt). As leituras de permissividade do meio, obtidas pelo SC, eram realizadas diariamente, às 08:00 h da manhã, utilizando a interface de leitura ProCheck ((Decagon Devices, Pulman, WA).

2.5.10 Análise dos resultados

Para cada vaso, análises de regressão foram realizadas entre as leituras dos sinais dos sensores e os respectivos valores de umidade dos materiais de solo/substrato, sendo escolhidos os modelos que apresentaram maior nível de significância. Em seguida, valores de umidade estimados pelos modelos selecionados (θ_e) foram correlacionados com os valores de umidade

determinados pelo método gravimétrico (θ_d) nos materiais de solo/substrato, e avaliados pelo índice de concordância de Willmott (d) (Equação 2), coeficiente de determinação (R^2) (Equação 3), índice de desempenho (c) (Equação 4) e o viés percentual (PBIAS) (MORIASI et al., 2007) (Equação 5). Além disso, os erros médios absolutos do maior quartil, referentes às diferenças de leituras entre θ_d e θ_e , foram submetidos ao teste F de Fisher, e analisados ao nível de 5% de significância.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n ((|E_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|))^2} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$c = \sqrt{R^2} \times d \quad (4)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Oi} - Y_i^{Ei}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{Oi})} \right] \quad (5)$$

Em que:

O_i = dados observados;

E_i = dados estimados;

\bar{O} = média dos dados observados;

n = número de dados.

Tabela 3. Critérios de interpretação do índice de desempenho (c).

Índice "c"	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito Bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sufrível
0,41-0,50	Mal
< 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

Para cada tipo de material de solo/substrato, os índices obtidos foram submetidos ao teste F de Fisher. Finalmente, os dados de umidade gerados pelos modelos foram comparados com os valores determinados diretamente, e apresentados em gráfico de dispersão, sendo calculados os mesmos índices supracitados.

2.5.11 Avaliação de sensibilidade à salinidade

Foram realizados testes de condutividade elétrica (CE) para avaliar o efeito da variação do nível de salinidade do meio no sinal do sensor, sendo utilizadas diferentes concentrações de cloreto de potássio (KCl) (3 molar) diluídas em água deionizada. O teste foi realizado de acordo

com a metodologia proposta por Zabolotnyi e Koshevoi (2020), em que os 5 sensores foram analisados em uma faixa de 0-7 dS m⁻¹. Foram adicionados, em média, 3,5 mL de KCl para que a variação da CE da solução fosse de 1,0 dS m⁻¹. O conjunto solução e sensor foram colocados sobre um agitador magnético para a homogeneização da solução e a cada adição de sal eram realizadas as medidas de CE da solução por meio de um condutivímetro digital.

O sensor foi fixado a uma haste de ferro e mergulhado totalmente em um Becker de 1,0 L com solução de água deionizada, e conectado a uma placa Arduino que efetuou leituras do sinal de frequência a cada 5,0 s. Foi determinado um intervalo de 3,0 min ou até que o sinal estabilizasse para que uma nova adição do sal fosse realizada.

2.5.12 Avaliação do efeito da temperatura

Para avaliar o comportamento do sinal em diferentes temperaturas, o sensor foi submerso em água destilada à temperatura ambiente (26,5 °C) sob um agitador magnético com aquecimento, que foi configurado para atingir temperatura de 45 °C. A temperatura era determinada em tempo real por meio de um termômetro colocado no interior do líquido.

Usando a mesma estrutura de fixação e leitura de dados utilizada no teste de CE, a leitura do sinal de frequência era realizada a cada 5,0 s para observar variações na resposta do sensor a cada aumento de 5,0 °C na temperatura da água.

2.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.6.1 Avaliação de desempenho dos sensores (SCP e SC) nos diferentes materiais de solo/substrato

As variações de frequência do SCP foram de 41,05; 51,11 e 16,69 kHz para o SI (textura arenosa), SII (textura média), SIII (textura argilosa), respectivamente, e a variação máxima foi observada no biossólido, com amplitude de 85,11 kHz. A resposta do sinal do SCP pode ser explicada pelas granulometrias nos diferentes tipos de materiais de solo/substrato utilizados. O biossólido apresenta teor de areia grossa acima de 70% (Tabela 1), com a maioria de suas partículas apresentando diâmetro médio entre 0,05 e 2 mm, e, conseqüentemente, menor superfície específica. Por outro lado, o material SIII apresentou 69% das suas partículas com diâmetro médio inferior a 0,05 mm, dos quais 46% tinham diâmetro médio inferior a 0,002 mm. Ressalta-se que apesar de apresentar maior teor de matéria orgânica (MO), característica que melhora a retenção da umidade no solo, a retenção de água a -80 kPa no biossólido foi inferior aos demais materiais analisados, proporcionando maior amplitude entre os valores iniciais e finais de θ . A capacidade da MO em reter umidade diminui a fração de água livre no solo, e a menor densidade observada nestes substratos também leva à diminuição na permissividade do solo (SZYPŁOWSKA et al., 2021). Portanto, devido às características deste substrato, era esperado que a variação da frequência em função da umidade do substrato fosse maior.

Os parâmetros dos modelos ajustados entre o período (SCP) e permissividade (SC) com a umidade volumétrica, e os respectivos níveis de significância e coeficiente de determinação são apresentados na Tabela 4. A análise de regressão indicou o modelo polinomial de primeiro grau como o mais adequado para os SC, enquanto para os SCP o modelo de segundo grau foi o mais adequado para estimativa da umidade nos diferentes materiais de solo/substrato. Verma e Pahuja (2021) também observaram melhorias na acurácia utilizando sensor capacitivo ao ajustar a variação da umidade do solo utilizando um polinômio de segundo grau, com valores de R^2 superiores a 95%.

Tabela 4. Modelos ajustados entre valores de umidade volumétrica (y, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e período (x, em ms - SCP), e permissividade (x, em F m^{-1} - SC).

Materiais de solo/substrato	Sensor	Vasos	Parâmetros do modelo selecionado ($y = a1 + a2x + a3x^2$)			p	R2
			a1	a2	a3		
Biossólido	SCP	V1	-0,0023	-3,9584	704,0010	2,200X10-16	0,9876
		V2	-0,1119	11,5691	661,0633	9,504X10-14	0,9735
		V3	-0,1937	19,3942	558,2083	1,637X10-14	0,9787
		V4	-0,1795	36,2300	-789,3422	4,870X10-11	0,9701
		V5	-0,1990	28,7846	-429,6566	5,071X10-16	0,9925
	SC	V1	-0,0494	2,846X10-5	-	2,200X10-16	0,9889
		V2	-0,0452	2,944X10-5	-	2,200X10-16	0,9849
		V3	-0,0268	2,842X10-5	-	1,543X10-10	0,9102
		V4	-0,0426	4,303X10-5	-	1,642X10-13	0,9518
		V5	-0,0730	2,022X10-5	-	3,857X10-16	0,9846
SI	SCP	V1	0,4883	-88,1315	4955,2359	5,135X10-8	0,9582
		V2	0,2889	-47,4684	2947,0117	2,142X10-7	0,9597
		V3	1,2047	-224,5812	11465,8685	3,181X10-6	0,9266
		V4	1,9903	-424,5334	23717,8050	4,969X10-6	0,9190
		V5	0,2821	-46,1389	2241,9322	2,012X10-9	0,9690
	SC	V1	0,0620	2,430X10-5	-	3,028X10-4	0,9283
		V2	0,0678	2,426X10-5	-	2,582X10-4	0,9327
		V3	0,0293	3,592X10-5	-	2,06X10-4	0,9531
		V4	0,0484	2,576x10-5	-	2,858x10-5	0,9188
		V5	0,0439	1,930x10-5	-	4,287x10-6	0,9526

Continua...

Continuação da **Tabela 4.**

Materiais de solo/substrato	Sensor	Vasos	Parâmetros do modelo selecionado ($y = a1 + a2x + a3x^2$)			p	R2
			a1	a2	a3		
SII	SCP	V1	1,2622	-214,0417	9871,6127	2,976X10-6	0,8601
		V2	0,1432	-11,2897	806,2631	3,477x10-6	0,9029
		V3	2,0573	-340,0677	14865,2341	2,421X10-6	0,8648
		V4	0,1335	-19,5824	1741,8951	2,468X10-9	0,9453
		V5	1,8863	-401,9309	22427,8799	2,539X10-5	0,8000
	SC	V1	0,0133	2,603X10-5	-	2,200x10-16	0,9931
		V2	0,0012	2,526x10-5	-	9,634x10-15	0,9867
		V3	0,0129	2,540x10-5	-	5,206X10-14	0,9877
		V4	0,0012	2,732X10-5	-	3,167X10-13	0,9838
		V5	-0,0288	2,203X10-5	-	3,821X10-12	0,9762
SIII	SCP	V1	4,8501	-979,9387	50680,5069	1,028X10-4	0,8412
		V2	7,2386	-1400,7723	68534,3220	1,181x10-7	0,9506
		V3	4,9655	-1027,9057	54275,1232	1,255x10-11	0,9921
		V4	4,6010	-1234,5091	84464,8162	6,283x10-8	0,9420
		V5	3,1679	-781,6434	49612,5894	3,199x10-8	0,9487
	SC	V1	-0,0085	3,912X10-5	-	4,933x10-10	0,9872
		V2	0,0105	3,808X10-5	-	3,342X10-12	0,9926
		V3	0,0212	3,117x10-5	-	1,023x10-12	0,9942
		V4	0,0226	2,888X10-5	-	2,200x10-16	0,9988
		V5	0,0132	1,844x10-5	-	5,632x10-11	0,9806

A Figura 10 apresenta o resultado da análise de correlação entre os valores de umidade determinados (θ_d) (gravimétrico) e estimados (θ_e) pelos modelos ajustados com o uso do sensor desenvolvido (SCP) e do comercial (SC), para os diferentes materiais de solo/substrato.

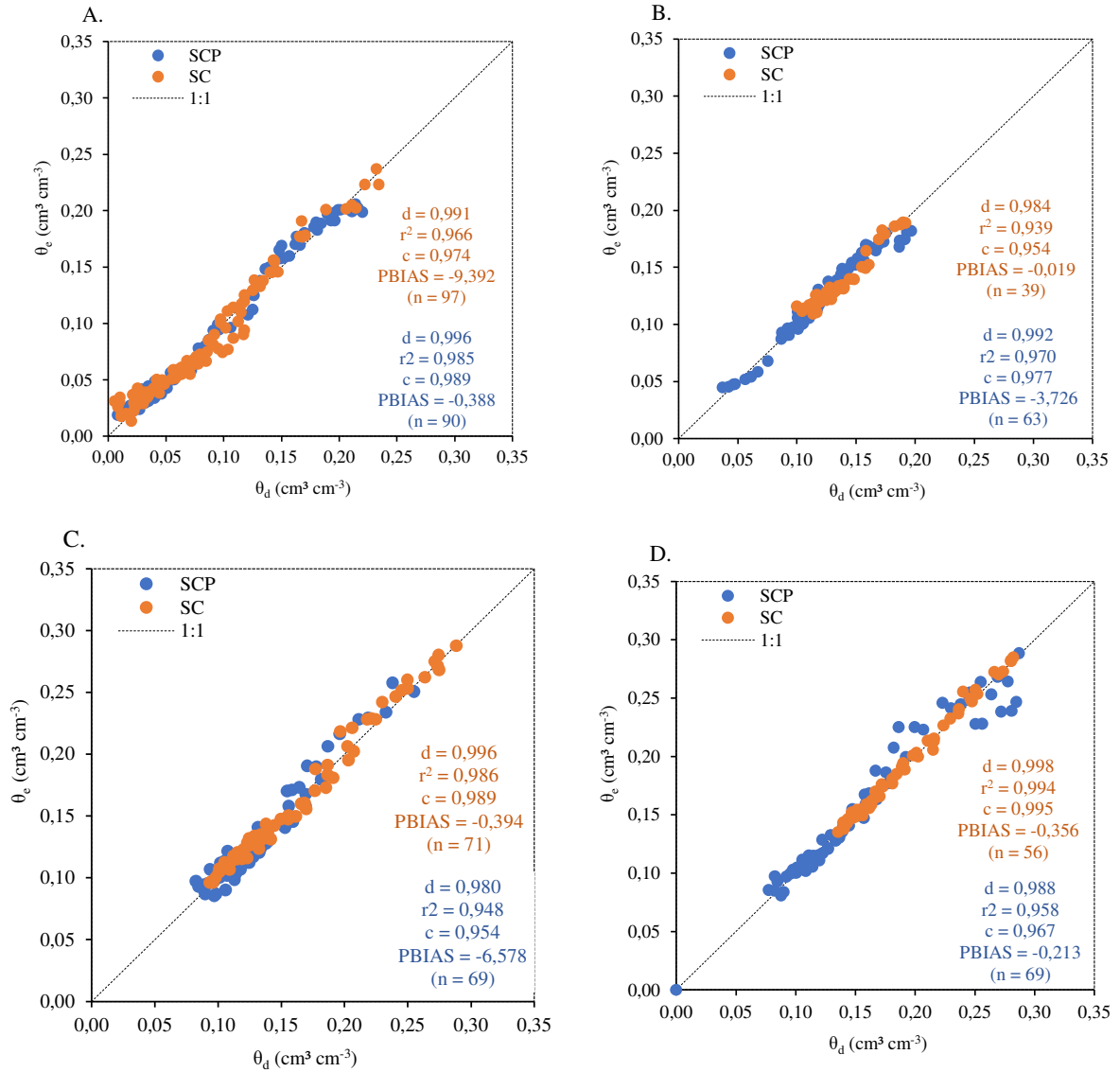


Figura 9. Análise de correlação entre os valores de umidade determinados (θ_d) e estimados (θ_e) pelos modelos ajustados com o uso do sensor desenvolvido (SCP) e comercial (SC), para o biossólido (A) e materiais de solo de textura arenosa (SI) (B), média (SII) (C) e argilosa (SIII) (D).

De um modo geral, os sensores avaliados foram capazes de estimar a umidade nos diferentes materiais de forma satisfatória, com índices de concordância (d) acima de 0,98, coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,94 e índice de desempenho (c) acima de 0,94. Os valores do viés percentual (PBIAS) indicam a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os observados, sendo que valores positivos indicam subestimativa e valores negativos, superestimativa dos dados (MORIASI et al., 2007). Para todos os materiais de solo/substrato avaliados, os sensores indicaram superestimativa que variaram de -9,392 (SC no biossólido) a -0,213 (SCP no solo III).

A maior dispersão dos dados no sinal do SCP ocorreu nos materiais de solo SI (Figura 10B) e SII (Figura 10C), enquanto para o SC, o pior resultado entre todos os sensores, foi observado no bio sólido (Figura 10A). Nos materiais de solo analisados (Figuras 10B, 10C e 10D) é possível observar aumento gradual da dispersão relativa do sinal no SCP, com a maior dispersão no SIII. Em solos de granulometria mais fina ocorre a formação de um filme de água em torno das partículas de solo, afetando a liberdade rotacional da molécula de água e diminuindo o campo dielétrico do meio, cuja magnitude depende diretamente da superfície específica e da carga elétrica da partícula (Roth et al., 1990). A formação deste filme pode proporcionar erros de superestimação na umidade do solo, levando a leituras de valores menores do campo dielétrico do meio em solos de textura fina em comparação aos de textura mais grossa. Este resultado pode ser confirmado pelo valor do índice PBIAS que indica erros de superestimativa no SCP no solo de textura média.

A atividade da argila também é uma característica que influencia no sinal do sensor capacitivo. Os movimentos de retração e expansão do solo, devido a atividade da argila, podem comprometer a leitura de umidade pela formação de interface gás-sensor. Singh et al. (2018) observaram que os maiores erros de medição da umidade do solo utilizando sondas capacitivas ocorreram em condição de maior conteúdo de argila e em solos com argila 2:1 (esmectita).

Erros de estimativa dos valores da umidade do solo/substrato podem ocorrer devido às interferências nos sensores provocadas pela textura do solo, propriedades químicas e físicas, temperatura e a salinidade do solo (TOPP et al., 1980). Utilizando sensores com frequência de medição abaixo de 100 MHz, Boga et al. (2007) e Topp et al. (1980) observaram que a constante dielétrica era afetada pela granulometria das partículas de solo, levando a erros de medição. Roth et al. (1990) observaram que a porosidade do solo interfere diretamente na constante dielétrica, podendo levar a erros na medição da umidade do solo. O SCP opera em uma faixa de operação inferior a 1,0 MHz, podendo ser esta mais uma característica responsável pela dispersão no sinal entre os materiais de solo com maiores teores de argila. Os SC trabalham em faixas de frequência em torno de 70 MHz, e no SIII e no bio sólido foram observados erros maiores aqueles observados nos SCP, assim como o PBIAS, que indicou a maior tendência de superestimativa dos dados pelo SC no bio sólido. Logo, os resultados obtidos pelo SC demonstram que mesmo operando em faixa de frequência superior ao SCP, ainda se faz necessário a calibração in-situ para resultados mais precisos.

A eficácia no uso de sensores capacitivos na determinação da umidade tem sido avaliada em diferentes classes de solo, uso e ocupação. Lo et al. (2020) trabalharam em um solo mineral de textura média sob rotação de milho-soja em plantio direto, Gomes et al. (2017) em um Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) de textura média e Pizetta et al. (2017) em Argissolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférrico e Nitossolo Vermelho eutroférrico, sendo identificados R^2 superiores a 0,90 após a calibração, concordando com os resultados encontrados neste trabalho.

Houve diferença significativa entre os sensores para o erro médio absoluto do maior quartil apenas para o solo III (argiloso) (0,0178 cm³ cm⁻³) (Tabela 5). De uma maneira geral, mesmo com a diferença observada entre os sensores, ambos funcionaram da maneira esperada, apresentando baixo erro na determinação do conteúdo de água no solo.

Tabela 5. Erro médio absoluto do maior quartil entre valores de umidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) obtidos pelos sensores desenvolvido (SCP) e comercial (SC), para os diferentes materiais de solo/substrato.

Materiais de solo/substrato	Sensor		valor-P
	SCP	SC	
Biossólido	0,0117	0,0150	0,3891
SI	0,0089	0,0070	0,1259
SII	0,0135	0,0105	0,1016
SIII	0,0178	0,0045	0,0032*

* signitativo a 5% de probabilidade.

2.6.2 Avaliação da sensibilidade à salinidade e temperatura

A Figura 11 apresenta o resultado da análise de sensibilidade dos sensores desenvolvidos (SD) em resposta a diferentes níveis de salinidade e temperatura da água.

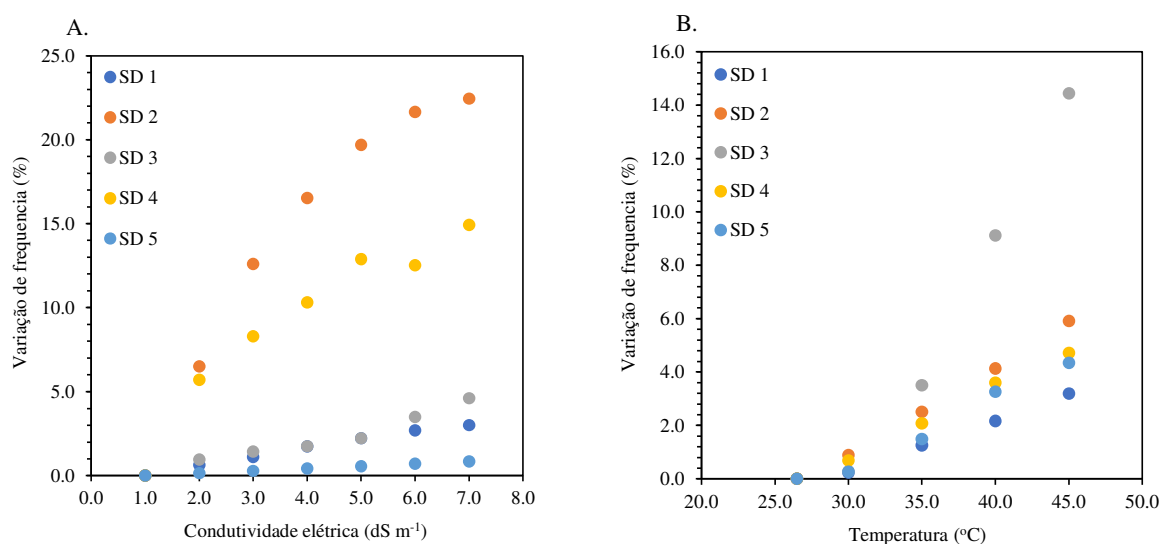


Figura 10. Sensibilidade do sensor desenvolvido ao aumento da condutividade elétrica (A) e temperatura (B) da água.

A variação entre as respostas do sinal dos sensores avaliados está relacionada à técnica construtiva empregada (realizada de forma artesanal), que pode ter proporcionado diferenças na espessura da camada de verniz e na distância entre as placas dos capacitores. Maiores variações de frequência foram observadas nos sensores 2 (SD 2) e 4 (SD 4), com variação máxima de, respectivamente, 22% e 15%, para solução com CE de 1,0 a 7,0 dS m^{-1} (Figura 11A). Para a salinidade variando de 1,0 a 4,0 dS m^{-1} , faixa de caracterização para solos salinos, a variação nos sinais foi inferior a 2%, para SD1 e SD3, e inferior a 0,5% para o SD5. Para as demais unidades, a variação alcançou 16,5% para SD2 e 10,3% para SD4.

A variação da CE do meio pelo aumento da concentração de íons influencia a constante dielétrica, levando ao aumento dos valores de permissividade elétrica e, consequentemente, da capacitância (EVETT et al., 2006). Portanto, devido a relação inversa entre F e C, o aumento da CE causa a diminuição da frequência, superestimando os valores de umidade do solo. Zabolotnyi & Koshevoi (2020) observaram superestimativas no teor de água utilizando de sensores capacitivos ao alterar as propriedades químicas da solução utilizada. Analisando diferentes sondas capacitivas, Bogen et al. (2007) e Evett et al. (2006) também observaram

superestimativas nos valores de umidade com aumento da CE do meio, atribuindo a variação observada à faixa de frequência que estes sensores operam. Em frequências abaixo de 100 MHz os erros nas medidas de umidade volumétricas do solo chegaram a 1,3% e 5,4% em solos com CE de 0,1 e 1,0 dS m⁻¹.

Os SD trabalham em faixas de frequência abaixo de 1,0 MHz, considerada por Bogena et al. (2007) suscetíveis a interferência da permissividade elétrica do meio no sinal do sensor. Estas interferências influenciam as medições da constante dielétrica em meios porosos com conteúdo de água semelhante, mas diferentes CE. Além disso, a presença de cargas iônicas livres potencializa o efeito de Maxwell-Wagner (M-W) em sensores operando com frequências entre as faixas de kHz e MHz (CHEN & OR, 2006).

Com relação à variação de temperatura, todos os sensores apresentaram redução nos valores de frequência, com maior variação no sensor 3 (SD3) (14,5%) (Figura 11B). O sensor SD 1 apresentou variação na frequência de apenas 3,2% entre 26,5 e 45,0 °C. Vale ressaltar que a variação de temperatura no perfil de solos é muitas vezes inferior à utilizada no teste com água.

As propriedades dielétricas em material de composição heterogênea são determinadas principalmente pelo volume do componente com o maior valor do dielétrico, que no caso do solo, é a água. O aumento na temperatura exerce influência na agitação dos íons presentes na água e, consequentemente, na condutividade elétrica do solo, potencializando o efeito M-W. O aumento do efeito de M-W proporciona aumento da permissividade dielétrica do solo em medições de baixa frequência (CHEN & OR, 2006). Topp et al. (1980) também cita que a temperatura é um dos fatores que afetam a constante dielétrica do solo.

2.7 CONCLUSÕES

- i) Dentre os tipos de capacitores, placas de circuito impresso e materiais isolantes avaliados, o sensor com planar construído em placa de fibra de vidro e isolado com verniz (SCP) apresentou maior sensibilidade na estimativa da umidade do solo, além de maior facilidade construtiva.
- ii) O SCP apresentou desempenho satisfatório nos diferentes materiais de solo/substrato, proporcionando pequeno erro na determinação do conteúdo de água no solo ($0,0178 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).
- iii) O SCP apresentou baixa sensibilidade nas faixas de salinidade e temperatura da água normalmente observadas no perfil do solo.

2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARDUINO. **Arduino language reference documentation**. 2021. Disponível em: www.arduino.cc/reference/en/. Acesso em 10 de outubro de 2021.
- BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; OBERDÖRSTER, C.; VEREECKEN, H. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. **Journal of Hydrology**, v. 344, n. 1-2, p. 32-42, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.032>.
- CHANASYK, D.; NAETH, M. Field measurement of soil moisture using neutron probes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 76, p. 317-323, 1996. 10.4141/cjss96-038.
- CHEN, Y.; OR, D. Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity. **Water Resource Research**, v. 42, W06424, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005WR004590>.
- DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, v. 93, p. 67-78, 1987. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90194-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90194-6).
- 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. <https://doi.org/10.2136/vzj2005.0149>.
- GOMES, F. H. F.; CUNHA, F. N.; FILHO, L. C. L.; VIDAL, V. M.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B. Calibração de um sensor de umidade do solo de baixo custo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1509-1516, 2017. 10.7127/rbai.v11n400605.
- GUAN, Y.; FREDLUND, D. G. Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 34, n. 4, p. 604-614, 1997. <https://doi.org/10.1139/t97-014>.
- KAMIENSKI, C.; VISOLI, M. C. Swamp: uma plataforma para irrigação de precisão baseada na internet das coisas. **Fonte**, v. 15, p. 76-84, 2018.
- KICAD. **Cross platform and open source electronics design automation suite**. 2021. Disponível em: Kicad.org. Acesso em 12 de abril de 2021.
- LO, T. H.; RUDNICK, D. R.; SINGH, J.; NAKABUYE, H. N.; KATIMBO, A.; HEEREN, D. M.; GE, Y. Field assessment of interreplicate variability from eight electromagnetic soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 231, p. 105-984, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105984>.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. 10.13031/2013.23153.

- ODUOR, N.; KIBOI, M.; MURIUKI, A.; ADAMTEY, N.; MUSAFIRI, C.; NGETICH, F. Soil management strategies enhanced crop yield, soil moisture, and water productivity in Nitisols of the Upper Eastern Kenya. **Environmental Challenges**, v. 5, 100375, 2021. [10.1016/j.envc.2021.100375](https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100375).
- PERTASSEK, T.; PETERS, A.; DURNER, W. Hyprop-fit Software **User's Manual, V.3.0, UMS GmbH**. Version 3.0, München/Germany. 66p, 2015.
- PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; PACHECO, F. E. D.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 458-468, 2017.
- ROTH, K.; SCHULIN, R.; FLÜHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach. **Water Resources Research**, v. 26, n. 10, p. 2267-2273, 1990. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267>.
- ROTIMI OJO, E.; BULLOCK, P. R.; FITZMAURICE, J. Field Performance of Five Soil Moisture Instruments in Heavy Clay Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, p. 20-29, 2015. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0250>.
- SHARMA, H.; SHUKLA, M. K.; BOSLAND, P. W.; STEINER, R. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 81-91, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>.
- SINGH, J.; LO, T.; RUDNICK, D. R.; DORR, T. J.; BURR, C. A.; WERLE, R.; SHAVER, T. M.; MUÑOZ-ARRIOLA, F. Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 87-98, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.020>.
- SONGARA, J. C.; PATEL, J. N. Calibration and Comparison of Various Sensors for Soil Moisture Measurement. **Measurement**, v. 197, n. 30, p. 111-301, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111301>.
- SZYPŁOWSKA, A.; LEWANDOWSKI, A.; YAGIHARA, S.; SAITO, H.; FURUHATA, K.; SZEREMENT, J.; KAFARSKI, M.; WILCZEK, A.; MAJCHER, J.; WOSZCZYK, A.; SKIERUCHA, W. Dielectric models for moisture determination of soils with variable organic matter content. **Geoderma**, v. 401, p. 115-288, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115288>.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, p. 574-582, 1980. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.
- VERMA, S.; PAHUJA, R. Recalibration and performance comparison of soil moisture sensors using regression and neural network characteristic models. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, part 6, p. 4852-4861, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.306>.

VORIES, E.; SUDDUTH, K. Determining sensor-based field capacity for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, v.250, 106860, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106860>.

YU, H.; LIU, K.; BAI, Y.; LUO, Y.; WANG, T.; ZHONG, J.; LIU, S.; BAI, Z. The agricultural planting structure adjustment based on water footprint and multi-objective optimization models in China. ***Journal of Cleaner Production***, v. 297, n.15, 126646, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126646>.

ZABOLOTNYI, O.; KOSHEVOI, M. An effective method of bulk materials moisture measurement using capacitive sensors. ***Journal of Stored Products Research***, v. 89, 101-733, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101733>

3. CAPÍTULO II

DESENVOLVIMENTO DE MINI-LISÍMETROS PARA AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM VIVEIROS DE MUDAS FLORESTAIS

3.1 RESUMO

A evapotranspiração (ET) representa a quantidade de água transferida para a atmosfera, por evaporação e transpiração, sendo considerada a variável mais ativa do ciclo hidrológico e a principal componente no balanço hídrico em ecossistemas agrícolas. A ET pode ser determinada por lisimetria de pesagem, possibilitando a estimativa da evapotranspiração de diferentes cultivos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar mini-lisímetros (ML) de pesagem visando a automação do sistema de irrigação, e a determinação da necessidade hídrica e avaliação do crescimento inicial de mudas de espécies arbóreas. A estrutura foi construída em madeira e com capacidade para uma bandeja de 54 tubetes de 280 cm³, e dotada de uma célula de carga com capacidade nominal de 10 kg, localizada no centro da estrutura. Utilizando uma placa Arduino Mega, as variações de massa do conjunto eram registradas em um micro cartão SD, que por meio de um algoritmo permitia o manejo automatizado da irrigação. Dois MLs foram construídos, possibilitando a determinação da necessidade hídrica de mudas de *Dalbergia Nigra* (JB) e *Enterolobium contortisiliquum* (OM) em fase inicial de crescimento. Após calibração, os MLs apresentaram sensibilidade adequada, com erro absoluto e erro quadrático médio inferiores a 1% da massa total, possibilitando o controle efetivo da irrigação. Ao longo do período de crescimento, foram aplicados 1,47 L muda⁻¹ de JB e 1,45 L muda⁻¹ de OM, que atingiram aos 89 dias após emergência, altura e diâmetro do coleto de, respectivamente, 39,2 cm e 3,4 mm, e 19,3 cm e 4,6 mm.

Palavras-chave: Lisimetria de pesagem. Evapotranspiração. Manejo da irrigação. Espécies arbóreas.

3.3 ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) represents the amount of water transferred to the atmosphere, by evaporation and transpiration, being considered the most active variable of the hydrological cycle and the main component in the water balance in agricultural ecosystems. ET can be determined by weighing lysimetry, allowing the estimation of evapotranspiration for different crops. The objective of this work was to develop and evaluate weighing mini-lysimeters (ML) aiming at the automation of the irrigation system, and the determination of the water requirement and evaluation of the initial growth of seedlings of tree species. The structure was built in wood and with capacity for a tray of 54 tubes of 280 cm³, and equipped with a load cell with a nominal capacity of 10 kg, located in the center of the structure. Using an Arduino Mega board, the mass variations of the set were recorded on a micro SD card, which, through an algorithm, allowed the automated management of irrigation. Two MLs were built, allowing the determination of the water requirement of *Dalbergia Nigra* (JB) and *Enterolobium contortisiliquum* (OM) seedlings in the initial growth phase. After calibration, the LMs showed adequate sensitivity, with absolute error and mean square error below 1% of the total mass, allowing effective irrigation control. During the growth period, 1.47 L seedling⁻¹ of JB and 1.45 L seedling⁻¹ of OM were applied, reaching 89 days after emergence, height and diameter of the collar of, respectively, 39.2 cm and 3.4 mm, and 19.3 cm and 4.6 mm.

Keywords: Weighing lysimetry. Evapotranspiration. Irrigation management. Tree species.

3.4 INTRODUÇÃO

Em função da grande área devastada em muitos ecossistemas no Brasil, processos de restauração florestal se fazem necessários exigindo, para isso, conhecimento científico e qualificação profissional (SANSEVERO et al., 2018). Nesse sentido, torna-se fundamental produzir mudas com alta qualidade e rusticidade, que são influenciadas, sobretudo, pela disponibilidade de água, tanto no tempo quanto em volume (KEFFER et al., 2019).

A falta de informação sobre a necessidade hídrica de espécies arbóreas promove desperdício de água nos viveiros (BUENO et al., 2020), que pode atingir 72% dependendo da espécie (DUMROESE et al., 1995). De acordo com Carvalho et al. (2021), tradicionalmente a irrigação em viveiros florestais é realizada sem nenhum tipo de manejo, o que compromete a eficiência do sistema e a qualidade das mudas produzidas.

A aplicação de água pelos sistemas de irrigação deve ser realizada a partir da evapotranspiração da cultura (ET), que representa a quantidade de água transferida do solo e das plantas para a atmosfera, num determinado intervalo de tempo (PEREIRA et al., 2015). A ET é a variável mais ativa do ciclo hidrológico e a principal componente no balanço hídrico em ecossistemas agrícolas (CARVALHO et al., 2015) e pode ser estimada por modelos matemáticos ou medida diretamente por instrumentos e sensores eletrônicos, e por lisímetros de pesagem (KOHFAHL et al., 2019). Quando projetados em pequena escala, são denominados mini-lisímetros e apresentam eficácia no monitoramento da ET e na programação automática da irrigação (MCCAUELY e NACKLEY, 2022).

A lisimetria tem sido utilizada de maneira extensiva no fornecimento de dados para o desenvolvimento, calibração e validação de métodos de determinação da ET. Porém, a eficácia do método está relacionada à escala em que estes equipamentos são utilizados, visto que a extrapolação dos dados obtidos no interior do lisímetro pode levar a erros na medição da ET (ALLEN et al., 2011).

Na lisimetria de pesagem, as variações de massa são determinadas pela pesagem do lisímetro, instalado em uma estrutura hidráulica de apoio que direciona o peso para uma célula de carga ou para um conjunto de células de carga (ALLEN et al., 2011; CARVALHO et al., 2007). Portanto, as variações de massa promovem variações no sinal elétrico da célula de carga e estão relacionadas ao processo de ET, fornecendo informações sobre a demanda de água pela cultura (MCCAUELY e NACKLEY, 2022).

A coleta de dados dos lisímetros pode ser automatizada, permitindo maior nível de informações sobre o processo de ET. Nessas condições, os lisímetros são conectados a microcontroladores que podem coletar e analisar os dados de evapotranspiração. O uso de componentes eletrônicos também permite o acionamento automático da irrigação, aplicando água em quantidade e momento adequados, conforme a análise em tempo real da demanda hídrica da cultura. Deste modo, a reposição de água é realizada de maneira “inteligente”, mantendo a umidade do solo/substrato no lisímetro em níveis adequados ao desenvolvimento das culturas.

Diante do exposto, é fundamental o desenvolvimento de tecnologias acessíveis que permitam o monitoramento da ET e garantam um funcionamento adequado dos sistemas de irrigação. Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver e avaliar mini-lisímetros de pesagem visando automação do sistema de irrigação por meio de válvulas solenoides e sistema de controle e coleta de dados, e determinação da necessidade hídrica e avaliação do crescimento inicial de mudas de espécies arbóreas.

3.5 MATERIAL E MÉTODOS

3.5.1 Desenvolvimento e avaliação

O trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ (22°48'00'' S; 43°41'00'' W; e 30 m de altitude). De pequeno porte e de fácil instalação, o mini-lisímetro (ML) de pesagem foi desenvolvido em madeira a partir do modelo proposto por Carvalho et al. (2007), e destinado à avaliação da necessidade hídrica de mudas de espécies arbóreas em viveiros florestais.

A estrutura, de 0,70 x 0,49 x 0,138 m, tem capacidade para receber uma bandeja de mudas de 54 tubetes de 280 cm³ (Figura 1A). Contêm barras transversais articuladas a fim de concentrar a massa do conjunto (bandeja + mudas) em uma célula de carga com capacidade nominal de 10 kg, localizada no centro da estrutura (Figura 1B).

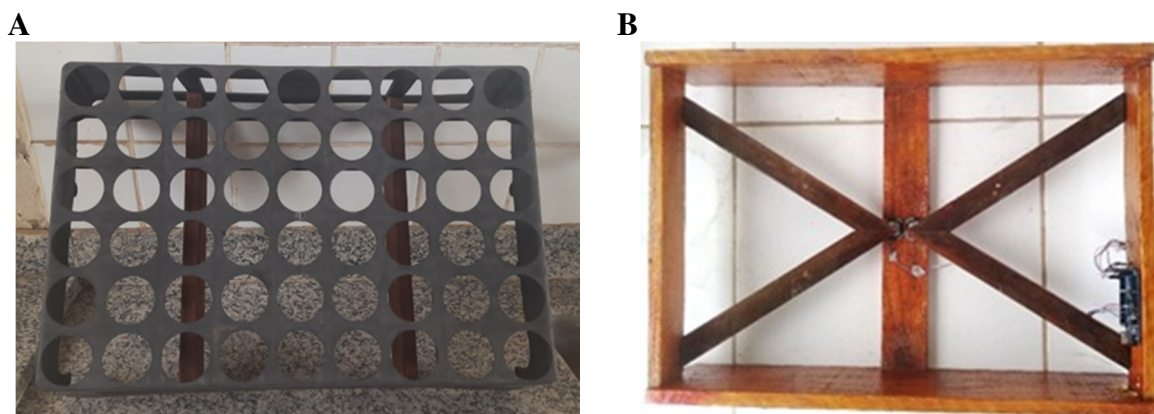


Figura 11. Bandeja de mudas com para 56 tubetes (A) e estrutura do mini-lisímetro em madeira (B).

Um sistema de coleta de dados foi desenvolvido para armazenar informações em um micro cartão SD por meio do módulo SPI (SHARMA et al., 2017), gerando um relatório de saída no formato de arquivo de texto (txt) contendo as informações: data, dia da semana, hora, massa do conjunto a cada 10 min, e massa de água aplicada na irrigação (se houver). Para a coleta e armazenamento dos dados foi utilizada uma placa de prototipagem eletrônica Arduino Mega 2560, que trabalha com tensão nominal de 5,0 V ou 3,3 V e possui 54 pinos de entrada/saída digitais, dos quais 15 podem ser usados como saídas *Pulse With Modulation* (PWM) e 16 entradas analógicas. O microcontrolador da placa é baseado no ATmega2560 de 8 bits e o processador opera com um oscilador de cristal de 16 MHz, e protocolos de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter-IntegratedCircuit* (I2C) e *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (UART) (Arduino INC., 2022).

O ML foi calibrado conforme metodologia apresentada por Carvalho et al. (2007) e Vilela et al. (2015). Para isso, tubetes com substrato foram adicionados e retirados da bandeja em 5 ciclos de carregamento e descarregamento. A cada variação de massa, o sinal elétrico (mV) proveniente da célula de carga era registrado e transformado em valores de massa para leitura no microcontrolador.

A tradução e amplificação do sinal elétrico em valores de massa foi realizada pelo módulo de amplificação e condicionamento de sinal HX711 (Figura 2), que é um circuito contendo um amplificador operacional e um conversor analógico digital, que transforma o sinal elétrico da célula de carga em valores de massa, após a calibração. Este módulo possui dois

pinos de alimentação (Vcc e GND), dois pinos para alimentação da célula de carga (E+ e E-) e 4 pinos de leitura do sinal da célula de carga (A+, A-, B+, B-). Os pinos de DT e SCK são pinos de saída de dados e de relógio, respectivamente.

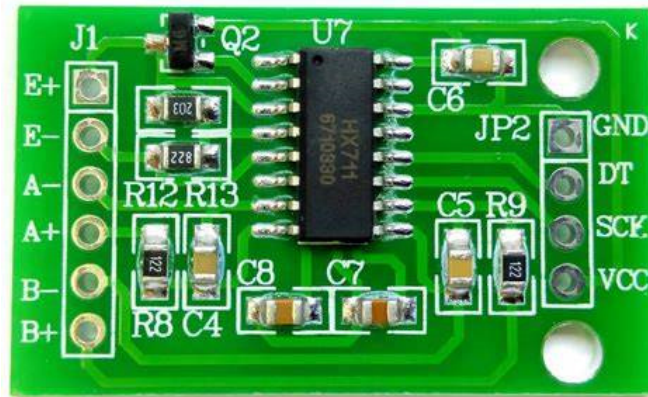


Figura 12. Módulo HX711.

Com os dados da calibração foram avaliadas a precisão e a exatidão do ML por meio da análise de correlação e do cálculo do erro absoluto (MAE) e do erro quadrático médio (RMSE).

3.5.2 Automação da irrigação

Para automatização da irrigação foi implementado um algoritmo no microcontrolador que diariamente (às 5:00 h) calcula a diferença de massa relativa a duas leituras consecutivas no ML (Figura 3), servindo de referência para a irrigação. Esse horário foi escolhido em função da menor ocorrência de fatores ambientais como ventos e altas temperaturas, que poderiam causar desvios na massa calculada pela célula de carga. Portanto, a irrigação foi programada para acionamento diário, em resposta à variação de massa no ML.

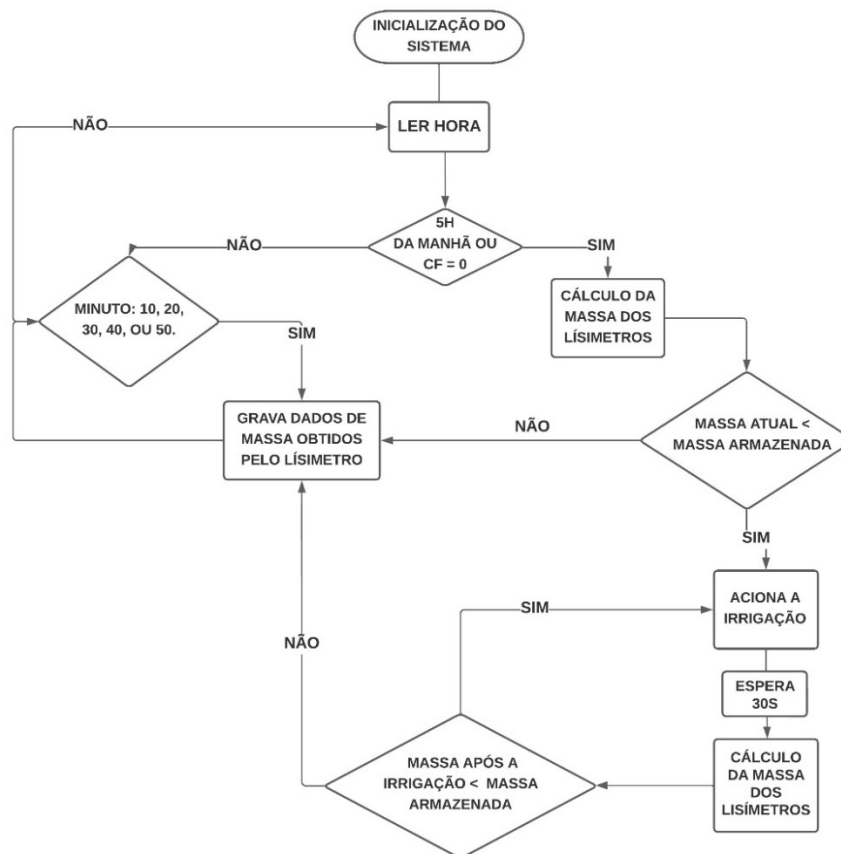


Figura 13. Lógica de programação para automação da irrigação via lisimetria (Lucid App).

Na entrada do ML foi instalada uma válvula solenoide (Emicol/12V, classe H), normalmente fechada, acionada por um relé conectado a uma porta digital do microcontrolador. Quando o valor da diferença de massa calculada for positivo, o algoritmo emite um sinal elétrico acionando o relé, aumentando o sinal na porta correspondente do Arduino. Neste momento, a energização promove a abertura da válvula solenoide, permitindo a irrigação das mudas de forma automática. O uso do relé é necessário para aumentar a corrente elétrica que chega à solenoide, uma vez que o Arduino não libera corrente suficiente para tal.

O sistema de irrigação foi composto por uma malha de gotejadores (Netafim, PCJ-HCNL) de vazão nominal $2,0 \text{ L h}^{-1}$, com 1 emissor por muda, totalizando 14 emissores por lisímetro (Figura 4). Os tubetes foram espaçados na bandeja de modo a não haver competição por luz entre as mudas, e para garantir espaço físico suficiente para melhor se desenvolverem. A avaliação da vazão indicou uniformidade (CUC) e distribuição (CUD) dos emissores acima de 97%.



Figura 14. Mini-lisímetros com a malha de irrigação por gotejamento.

O tempo de irrigação (t) foi calculado pela razão entre a variação de massa diária (Δ) e a vazão dos gotejadores (q), conforme Equação 6.

$$t = \frac{\Delta}{q} \times 3600000 \quad (6)$$

Antes do início do monitoramento do ML, os tubetes foram molhados durante um tempo suficiente para iniciar a drenagem. Após cessada a percolação, os tubetes foram distribuídos na bandeja e a massa inicial do conjunto determinada, servindo de referência para a primeira semana do experimento.

3.5.3 Necessidade hídrica de mudas de espécies arbóreas

A avaliação da programação e do funcionamento do ML e simultaneamente a determinação da necessidade hídrica de mudas na fase de crescimento inicial foram realizadas para duas espécies arbóreas do bioma Mata Atlântica: *Dalbergia nigra* (Jacarandá-da-Bahia) (JB) e *Enterolobium contortisiliquum* (Orelha-de-macaco) (OM). Para isso, 2 ML foram construídos.

As mudas foram semeadas em tubetes de 280 cm³ preenchidos com biossólido puro, e irrigadas por microaspersão até 14 dias após a emergência (DAE), quando foram acondicionadas nos MLs apresentando, em média, 6,36 e 7,55 cm de altura e 1,12 e 1,28 mm de diâmetro, respectivamente, para JB e OM. Essas variáveis foram monitoradas periodicamente. As massas iniciais registradas nos ML foram de 6132,801 g para JB e de 7660,228 g para OM.

Os MLs foram montados em uma bancada coberta com lona plástica para evitar o molhamento das mudas por água da chuva (Figura 5).



Figura 15. Bancada experimental com os mini-lisímetros coberta com lona plástica.

A coleta dos dados foi realizada durante 55 dias, no período de 08/04 a 29/05/2022. A temperatura e a umidade relativa do ar foram registradas no interior da bancada por meio de um termo-higrômetro digital (marca/modelo).

Em função do crescimento das mudas, em parte aérea e raiz, proporcionando variação da massa de referência em cada ML, semanalmente o valor da massa do conjunto (bandeja + tubetes) na condição de pós irrigação (capacidade de campo) era atualizado na programação.

3.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.6.1 Avaliação da precisão e exatidão do mini-lisímetro

Os resultados obtidos na calibração dos MLs foram satisfatórios, indicando alta correlação entre os valores estimados pelo HX711 e a massa real dos tubetes (Figura 17). Portanto, o valor de R^2 associado aos valores médios de desvio padrão (49,89 e 20,78 g), coeficiente de variação (3,16% e 1,98%), MAE (0,060 e 0,090 g) e RMSE (27,24 e 19,01 g) correspondeu a menos de 1% da massa total sobre MLs, indicando boa exatidão e precisão do modelo na determinação da massa. De acordo com McCauley e Nackley (2022), com esse nível de precisão e acurácia, o ML pode efetivamente controlar a irrigação, com erros desprezíveis.

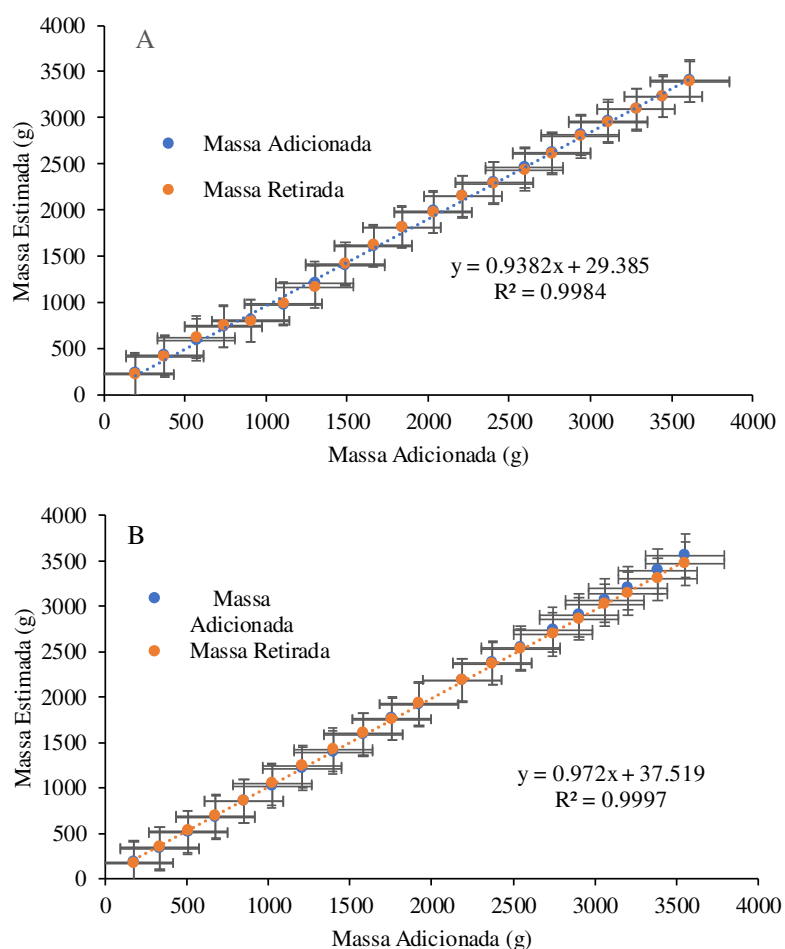


Figura 16. Valores de massa do conjunto medidos e registrados no HX711 para os mini-lisímetros automatizados com mudas de *Dalbergia nigra* (A) e *Enterolobium contortisiliquum* (B).

3.6.2 Avaliação da necessidade hídrica das mudas nos lisímetros

Durante o período de avaliação, foram registradas 57 irrigações para *Dalbergia nigra* (Figura 18A) e 55 irrigações para *Enterolobium contortisiliquum* (Figura 18B), que totalizaram 20,53 e 20,30 L de água por bandeja, respectivamente. Em média, a demanda total de água foi de 1,47 L de muda-1 e 1,45 L de muda-1 em JB e MO, respectivamente.

Utilizando o manejo automático da irrigação, Bueno et al. (2021) avaliaram o crescimento de mudas de *D. nigra* e encontraram um valor de 3,1 L por muda, com 37 e 58% de sombreamento.

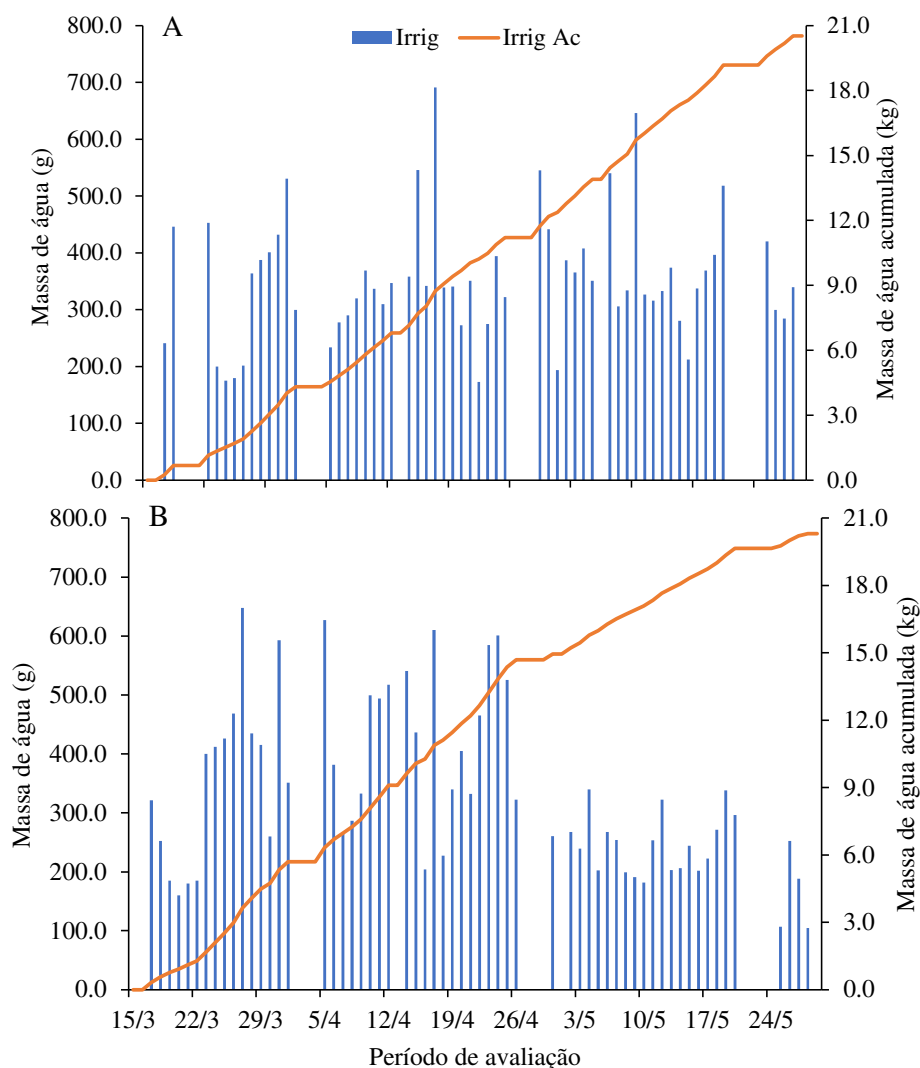


Figura 17. Massas de água aplicadas e acumuladas nas bandejas com 14 tubetes de *Dalbergia nigra* (A) e *Enterolobium contortisiliquum* (B).

Os maiores volumes de água aplicados diariamente por tubete em resposta à demanda evaporimétrica foram de 691 mL (JB), em 17/04, e 647,7 mL (OM), em 27/03. Nos dias seguintes a esses foram realizadas medições da altura e diâmetro do caule nas mudas que apresentaram valores médios de, respectivamente, 18,25 cm e 1,43 mm (JB) (aos 47 DAE) e de 10,40 cm e 1,79 mm (OM) (aos 27 DAE), respectivamente.

A diferença entre os volumes de água utilizados durante o período de coleta de dados pode ser explicada por características das próprias espécies florestais. De acordo com Nascimento Monteiro et al. (2016), geralmente, a demanda hídrica por mudas florestais aumenta quando a radiação solar aumenta, mas a demanda hídrica da planta também está relacionada ao seu desenvolvimento. Utilizando um mini-lisímetro, Lyianage et al. (2022) também observaram variações entre eventos irrigação e associaram essas diferenças ao tamanho da planta, uma vez que genótipos de maior porte utilizam a água do substrato mais rapidamente

do que aqueles de menor porte. Portanto, o crescimento da espécie deve ser conhecido para melhor compreender essas variações no consumo, como observado no presente estudo.

Os volumes de água aplicados foram de 16,9; 19,5 e 21,3 mL dia⁻¹ muda⁻¹ de *D. nigra*, respectivamente, nos meses de março, abril e maio, correspondendo a 19,6; 39,8 e 40,6% do volume total aplicado. Para a *E. contortisiliquum*, os volumes foram de 22,4; 22,9 e 13,7 mL dia⁻¹ muda⁻¹, respectivamente, nos meses de março, abril e maio, correspondendo a 26,3; 47,3 e 26,4% do volume total aplicado. Constata-se, portanto, a variação no consumo de água das mudas nas diferentes espécies.

Durante parte do período de avaliação dos equipamentos também foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar (Figura 19), que também influenciaram a demanda de água pelas espécies. A maior temperatura foi registrada em 16/04 (48,1 °C) proporcionando a maior lâmina de irrigação nas mudas de *D. nigra*.

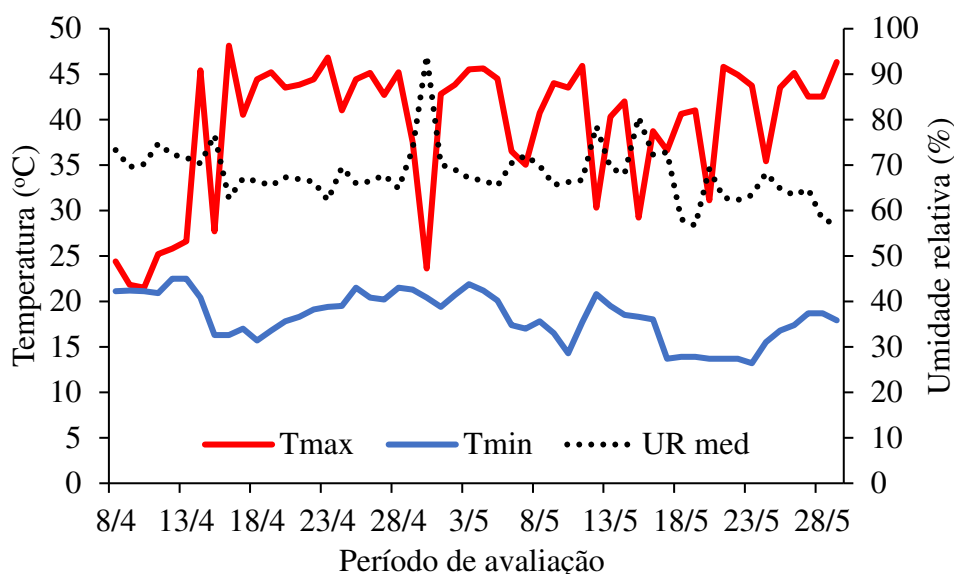


Figura 18. Valores de temperatura (°C) e umidade relativa do ar em parte do período de crescimento e avaliação das mudas.

3.6.3 Avaliação do desenvolvimento das mudas nos lisímetros

A avaliação das mudas em altura e diâmetro do coleto é apresentada em função de DAE (Figuras 20A e C) e volume de água aplicado por tubete (Figuras 20B e D), demonstra diferentes taxas de crescimento entre as espécies. As mudas de *D. nigra* apresentaram taxas crescentes de desenvolvimento, atingindo padrão de expedição (DAVIDE et al., 2015) aos 83 DAE (Figura 9A), com 36,0 cm de altura e 3,0 mm de diâmetro. Aos 89 DAE, as mudas apresentavam, respectivamente, 39,2 cm e 3,4 mm. Por outro lado, as mudas de *E. contortisiliquum* apresentaram taxas estáveis de desenvolvimento e, posteriormente, decrescentes, atingindo 19,3 cm de altura e 4,6 mm de diâmetro, ao final do mesmo período (Figura 20C).

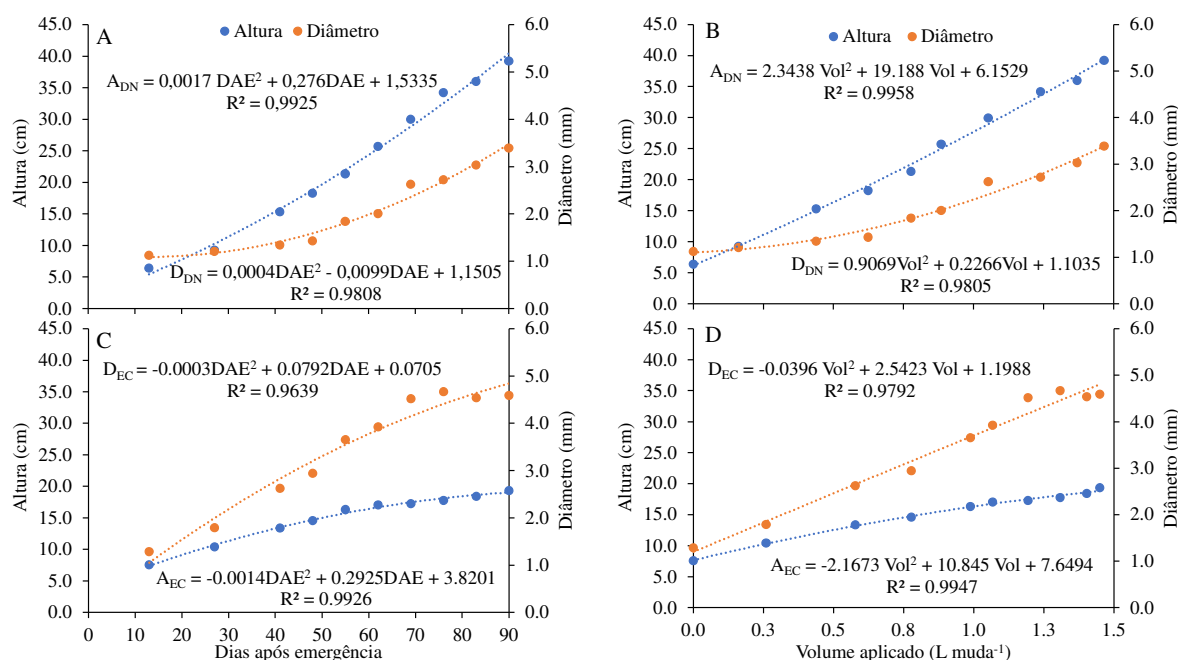


Figura 19. Crescimento em altura e diâmetro do coleto em função de dias após emergência e volume de água aplicado por tubete de *D. nigra* (A, C) e *E. contortisiliquum* (B, D).

As Figuras 20B e 20D confirmam a diferença na demanda hídrica das espécies (Figura 18) em função do crescimento em altura e diâmetro, com parâmetros positivo (*D. nigra*) e negativo (*E. contortisiliquum*) para o termo quadrático dos modelos. Aos 55 DAE, as mudas de *D. nigra* atingiram 54,3% do seu crescimento em altura (21,34 cm) e diâmetro (1,84 mm), enquanto as mudas de *E. contortisiliquum* atingiram 84,5% da sua altura (16,32 cm) e 79,6% do diâmetro (3,65 mm), no mesmo período. As mudas de *E. contortisiliquum* foram coletadas quando o diâmetro médio era superior a 4,5 mm, enquanto a altura média era inferior às mudas de *D. nigra*.

As diferenças observadas na Figura 20 estão associadas aos hábitos de crescimento das espécies avaliadas neste estudo. *E. contortisiliquum* é uma espécie de crescimento rápido, sem dominância apical, com tronco curto, acamamento caulinar e ramificações intensas e pesadas (CARVALHO, 2003), classificada como heliófita, pioneira, dispersa em diversas formações florestais (ARAÚJO e SOBRINHO, 2011), que pode chegar a mais de 4 m em dois anos. As plantas da espécie pioneira são menores que as de sucessão secundária (*D. nigra*) e pouco exigentes quanto às condições edáficas. Mudanças de *E. contortisiliquum* realizam relações simbióticas entre micorrizas arbusculares e o sistema radicular, e suas raízes apresentam grandes nódulos, coraloides, com distribuição superficial e atividade nitrogenásica.

D. Nigra é uma espécie semi-heliófila, que tolera sombreamento claro, sendo classificada como espécie de sucessão secundária, produzindo mudas de melhor qualidade quando submetidas ao sombreamento (BUENO et al., 2021). Seu crescimento varia de moderado a rápido, sendo que o maior aumento de altura ocorre em ambientes de produção com sombreamento de até 30% (CARVALHO, 2013).

A demanda por luz nas espécies florestais e a variedade de hábitos de crescimento resultam no desenvolvimento de comunidades estratificadas, nas quais uma espécie apresenta maior desenvolvimento da parte aérea (*D. nigra*) quando comparada àquelas cultivadas a pleno sol (*E. contortisiliquum*). No caso da JB, o ponto de compensação líquido, ou seja, o momento a partir do qual a intensidade luminosa não aumenta a fotossíntese líquida, varia de acordo com a fase fenológica. Na fase de enraizamento, a espécie apresenta comportamento heliófilo, ou

seja, com maior capacidade fotossintética (PC) em ambientes com maior luminosidade. Na fase de desenvolvimento, há uma redução do PC se submetido continuamente a pleno sol, com recuperação do PC quando a espécie é submetida ao sombreamento durante a fase de desenvolvimento (REGO e POSSAMAI, 2004). Portanto, o aumento da altura das mudas de JB pode ser explicado pela maior PC das plantas que crescem à sombra em relação àquelas que crescem à luz plena (OM), quando ambas são colocadas à sombra.

3.6.4 Análise de custos para o desenvolvimento do minilísímetro

A análise de custo dos materiais utilizados para o minilísímetro desenvolvido é apresentada na Tabela 6. A economia de água utilizada para o desenvolvimento de espécies florestais foi de aproximadamente 50% quando comparada ao trabalho realizado por Bueno et al. (2021) no mesmo local e utilizando a mesma espécie (JB). O custo para fazer o ML foi de R\$ 390,22, considerado baixo quando comparado à economia de água e energia em viveiros de produção de mudas em geral, principalmente espécies florestais.

Tabela 6. Preços dos componentes utilizados para desenvolver o sistema de irrigação automatizado.

Material	Valor Unitário (R\$)	Quantidade usada	Valor por minilísímetro (R\$)
Solenóide	20,83	1	20,83
Célula de carga	52,90	1	52,90
Módulo Relé	12,26	2	24,52
Arduino Mega	258,35	1	258,35
Módulo HX711	12,26	2	24,52
Gotejadores	0,65	14	9,10
Total			390,22

3.7 CONCLUSÕES

- i) Os mini-lisímetros (MLs) apresentaram sensibilidade adequada, indicando alta correlação entre os valores estimados pelo módulo HX711 e a massa real dos tubetes. O erro absoluto e o erro quadrático médio foram inferiores a 1% da massa total sobre os MLs, e foram indicados determinação da evapotranspiração de plântulas de espécies arbóreas.
- ii) Os mini-lisímetros desenvolvidos permitiram a automatização do manejo da irrigação e a avaliação da necessidade hídrica de mudas de *D. nigra* e *E. contortisiliquum* na fase inicial de crescimento.

3.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., HOWELL, T. A., JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, 98(6): 899-920, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.015>.
- BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; ABREU, J. F. G.; SANTOS, J. J. S.; CARVALHO, D. F. Water requirement and growth indicators of forest tree species seedlings produced with automated irrigation management. **PLoS One**, 15: e0238677, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238677>.
- BUENO, M. M., LELES, P. S. S., PINTO, M. F., DE RESENDE, A. S., COUTO, B. R. M., CARVALHO, D. F. Water use in the growth of Atlantic Forest tree species seedlings under different shading levels. **Ciência e Agrotecnologia**, 45:e025220, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145025220>.
- CARVALHO, D. F.; ROCHA, H. S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 50(1): 1-11, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100001>.
- CARVALHO, D. F., BUENO, M. M.; LELES, P. S. S., ABREU, J. F. G., MARTINS, R. C. F., MEDICI, L. O. Production and initial growth of forest species seedlings using sewage sludge and automated irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**, 45: e0173, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145017321>.
- CARVALHO, D. F., SILVA, L. D. B., GUERRA, J. G. M., CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, 27(2): 363-372, 2007.
- DAVIDE, A. C.; MELO, L.; CARVALHO, R. Fatores que afetam a qualidade de mudas destinadas aos projetos de restauração de ecossistemas florestais. In: DAVIDE, A. C.; BOTELHO, S. A. **Fundamentos e Métodos de Restauração de Ecossistemas Florestais**, 25: 181-274, 2015.
- DUMROESE R. K.; PAGE-DUMROESE D. S.; SALIFU K. F.; JACOBS D. F. Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance. **Canadian Journal of Forest Research**, 35: 2961-2967. 1995.
- KEFFER, J. F., SILVA, C. C. DA, SOUZA, A. P. DE, SILVA, A. C. DA, BOUVIÉ, L, DIAS, T. K. R. Evapotranspiration and water sensitivity of Amazonian yellow ipe seedlings under different shading conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23(10):733-740, 2019. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p733-740>.
- KOHFAHL, C., MOLANO-LENO, L., MARTÍNEZ, G., VANDERLINDEN, K., GUARDIOLA-ALBERT, C., MORENO, L. Determining groundwater recharge and vapor flow in dune sediments using a weighable precision meteorological lysimeter. **Science of the Total Environment**, 656: 550-557, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.415>.

LIYANAGE, K. D., CHATHURANGA, I., MORI, B., THILAKARATHNA, M. A. Simple, Semi-Automated, Gravimetric Method to Simulate Drought Stress on Plants. **Agronomy**, 12(2): 349, 2022; <https://doi.org/10.3390/agronomy12020349>.

MCCAUELY, D.; NACKLEY, L. Development of mini-lysimeter system for use in irrigation automation of container-grown crops. **Hardware** **X**, 11: e00298, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00298>.

MONTEIRO, E. B., SILVA, A. C., SOUZA, A. P., TANAKA, A. A., FERNEDA, B. G., MARTIM, C. C. Water requirements and crop coefficients of tropical forest seedlings in different shading conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 20(8): 709-715, 2016. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n8p709-715>.

MORIASI, D., ARNOLD, J., VAN LIEW, M., BINGNER, R., HARMEL, R. D. VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, 50(3): 885-900, 2007. 10.13031/2013.23153.

PACHECO, F., PEREIRA, C. E., SILVA, R. F. D., ALVARENGA, I. C. A. Crescimento inicial de *Dalbergia nigra* (Vell.) Allemão ex. Benth. (Fabaceae) e *Chorisia speciosa* A. St.-Hil (Malvaceae) sob diferentes níveis de sombreamento. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000500017>.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, 147: 4-20, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>.

PINEDA-GARCÍA, F., PAZ, H., MEINZER, F. Drought resistance in early and late secondary successional species from a tropical dry forest: the interplay between xylem resistance to embolism, sapwood water storage and leaf shedding. **Plant, Cell & Environment**, 36(2), 405-418, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2012.02582.x>.

SANSEVERO, J. B.; ALONSO, J. M.; BOOTH, M. C.; BUENO, M. M.; CARVALHO, L. S.; CLEMENTE N. On the teaching of ecological restoration in Brazil: an analysis of postgraduate courses. **Restoration Ecology**, 26: 997-1004, 2018. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/rec.12662/supinfo>.

SHARMA, H.; SHUKLA, M. K., BOSLAND, P. W. STEINER, R. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. **Agricultural Water Management**, 179: 81-91, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.001>.

SOUZA, C.; OLIVEIRA, R.; FILHO, S.; LIMA, J. Crescimento em campo de espécies florestais em diferentes condições de adubações. **Ciência Florestal**, 16(3): 243-249, 2006. <https://doi.org/10.5902/198050981905>.

TANG, J.; SUN, B.; CHENG, R.; SHI, Z.; LUO, D.; LIU, S.; CENTRITTO, M.. The Effect of Low Irradiance on Leaf Nitrogen Allocation and Mesophyll Conductance to CO₂ in Seedlings of Four Tree Species in Subtropical China. **Plants**, 10, 2213. 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10102213>.

TURCHETTO, F., ARAUJO, M. M., TABALDI, L. A., GRIEBELER, A. M., BERGHETTI, Á. L. P., RORATO, D. G., BARBOSA, F. M., & SASSO, V. M.. Irrigation Regimes on Growth and Metabolic Processes of *Enterolobium contortisiliquum* Seedlings. **Floresta e Ambiente**. 2020, v. 27, n. 2 <https://doi.org/10.1590/2179-8087.026318>.

VILELA, M. DA S., FILHO, F.R.C., TEIXEIRA, M.B., AMARAL, A.M., VELLAME, L.M., SOARES, F.A.L.. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. **Irriga**, 1(2): 158-167, 2015. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v1n2p158>.

ZAVISTANOVICZ, T., GASPARIN, E., ARAUJO, M., FILHO, A., AIM, S., FOLTZ, D., DORNELES, D..Nursery and field growths of *Enterolobium contortisiliquum* seedlings produced in different containers and fertilizer doses. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 15, n. 3, p. 1-8. 2020. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i3a7507>.

4. CONCLUSÕES GERAIS

O sensor capacitivo coplanar construído em fibra de vidro e isolado com verniz apresentou ótimo desempenho ao estimar o conteúdo de água em diferentes materiais de solo/substrato, com melhores resultados que o sensor comercial 5TE (Decagon) em substrato com biossólido (lodo de esgoto).

Os mini-lisímetros de pesagem desenvolvidos apresentaram sensibilidade adequada, indicando alta correlação entre os valores de massa estimados pelo módulo HX711 e a massa real dos tubetes, e permitindo a automatização do manejo da irrigação e a avaliação da necessidade hídrica de mudas de *D. Nigra* e *E. contortisiliquum* em fase inicial de crescimento.