



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM AUTOMAÇÃO DE BAIXO CUSTO
NO CULTIVO DA ALFACE SUBMETIDA A DIFERENTES
POTENCIAIS MATRICIAIS DO SOLO**

RODRIGO MOURA PEREIRA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2021



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM AUTOMAÇÃO DE BAIXO CUSTO
NO CULTIVO DA ALFACE SUBMETIDA A DIFERENTES
POTENCIAIS MATRICIAIS DO SOLO**

RODRIGO MOURA PEREIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. DELVIO SANDRI

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: TESE/2021

BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM AUTOMAÇÃO DE BAIXO CUSTO NO CULTIVO
DA ALFACE SUBMETIDA A DIFERENTES POTENCIAIS MATRICIAIS DO SOLO**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA**

Aprovada por:

DELVIO SANDRI (Orientador), Dr. - FAV/Universidade de Brasília

JOÃO JOSÉ DA SILVA JÚNIOR, Dr. - FAV/Universidade de Brasília

JORDANA MOURA CAETANO, Dra. – FAV/Universidade de Brasília

MARCIO ANTONIO VILAS BOAS, Dr. - UNIOESTE

BRASÍLIA/DF, 25 de Fevereiro de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Rodrigo Moura

Manejo de irrigação com automação de baixo custo no cultivo da alface submetida a diferentes potenciais matriciais do solo

118 p. : il.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2021.

1. Automação de Irrigação 2. Hortaliças 3. Arduino 4. Tensão de água no solo

I. Sandri, D. II Drº

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, R. M. Manejo da irrigação com automação de baixo custo no cultivo da alface submetida a diferentes potenciais matriciais do solo: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2021, 118 páginas. (Tese de Doutorado em Agronomia).

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: Rodrigo Moura Pereira

Título da Tese de Doutorado: Manejo da irrigação com automação de baixo custo no cultivo da alface submetida a diferentes potenciais matriciais do solo.

Grau: Doutor **Ano:** 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

RODRIGO MOURA PEREIRA

email: rodrigomouracbs@gmail.com

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela força interior, por me guiar e mostrar o caminho nos momentos incertos.

A meus pais (*in memoriam*) pelo amor incomparável e por terem me proporcionado todo o carinho e dedicação que me trouxeram até esta etapa da vida.

A minha esposa pelo amor, incentivo e companheirismo em todos os momentos.

Ao meu pequeno Pedro que me traz a alegria de viver todos os dias.

Ao professor Delvio Sandri, pela sua orientação, compreensão e enorme dedicação para a realização deste trabalho.

Aos professores que foram responsáveis pelo meu crescimento como cidadão e profissional e pelas inúmeras lições de vida e exemplos de dedicação ao ensino.

A todos os colegas da Pós-Graduação em Agronomia pela agradável convivência e auxílio prestado em diversas ocasiões.

Aos técnicos e funcionários da UnB pela prestatividade e apoio.

A todos aqueles que embora não mencionados contribuíram em alguma etapa do meu doutorado e da minha vida.

RESUMO GERAL

Atualmente grande parte dos recursos hídricos captados de fontes superficiais é utilizada na agricultura irrigada, no entanto, a utilização de técnicas de uso racional de água no manejo de irrigação ainda é incipiente, principalmente no contexto das pequenas propriedades rurais. Para suprir essa demanda, o manejo eficiente da irrigação com metodologias simples e acessíveis pode contribuir na difusão de sistemas de manejo e automação de irrigação que, além de garantir a produção mais eficiente de alimentos, contribuem com a redução do uso da água, energia, perda de nutrientes por lixiviação e incidência de pragas e doenças. No presente trabalho objetivou-se o desenvolvimento e avaliação de sistemas eletrônicos para aplicação na automação de irrigação a partir da estimativa da umidade do solo, utilizando para isso, tensiômetros eletrônicos adaptados a transdutores de pressão e sensores capacitivos de umidade do solo. O sistema de automação de irrigação foi desenvolvido a partir da integração entre módulos relés, *data logger* e tensiômetros eletrônicos com a placa micro controladora Arduino. Os tensiômetros eletrônicos foram avaliados na automação de irrigação mediante monitoramento dos potenciais matriciais críticos do solo para a alface (*Lactuca sativa* L.), cultivar Wanda, cultivada em ambiente protegido em embalagens com capacidade de 10 L, preenchidas com Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo regolítico (NR). O delineamento experimental foi em blocos completos casualizados, consistindo em dois tipos de solo e quatro níveis de potenciais matriciais críticos, sendo de -15, -20, -25 e -30 kPa para o LVA e -10, -15, -20 e -25 kPa para o NR. O acionamento da irrigação foi realizado automaticamente quando os potenciais matriciais críticos pré-estabelecidos eram atingidos e o desligamento ocorreu após a aplicação da lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo ao potencial de -10 kPa no LVA e -5 kPa no NR. As plantas de alface foram avaliadas quanto ao número de folhas (NF), altura do caule (AC), diâmetro do caule (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA) e raízes (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR), índice Falker de clorofila e eficiência do uso da água (EUA). Ainda, foram avaliados nove sensores capacitivos SKU:SEN0193 acoplados à plataforma Arduino na estimativa da umidade volumétrica do solo em amostras deformadas de LVA, NR e Latossolo Vermelho (LV). Os sensores foram avaliados quanto à sua acurácia e precisão na estimativa da umidade volumétrica das amostras desde a saturação até a umidade residual. Por fim, realizou-se uma análise de custos do sistema proposto em comparação a um modelo de automação com equipamentos convencionais disponíveis no mercado. A utilização da média

móvel nas leituras dos tensiômetros eletrônicos auxiliou na estabilidade da automação da irrigação dentro dos limiares de potencial adotados em LVA e NR, com variação máxima de 4,7 e 3,9% no acionamento em LVA e NR, respectivamente e de 23,1 e 15,4% no desligamento em LVA e NR, respectivamente. O potencial crítico de -10 kPa em NR resultou no maior crescimento da parte aérea e desenvolvimento das raízes da alface com eficiência de uso da água (EUA) de $0,44 \text{ g mm}^{-1}$, enquanto que no LVA, no potencial de -15 kPa a EUA foi de $1,31 \text{ g mm}^{-1}$, porém com menor crescimento da parte aérea e raízes, em comparação ao NR. A partir de -15 kPa em NR a EUA é reduzida em 50% e o crescimento da cultura é prejudicado. Os potenciais adotados em LVA não resultaram em diferenças significativas na maioria das características avaliadas na alface cultivada em embalagens, onde o potencial de -10 kPa em NR foi o que apresentou a melhor resposta dentre os potenciais adotados nos dois tipos de solo. Os sensores capacitivos apresentaram modelos de calibração polinomiais para cada tipo de solo avaliado, onde o erro quadrático médio (RMSE) foi de 0,08, 0,12 e $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para o LVA, NR e LV, respectivamente. A variabilidade de leitura entre sensores indica a necessidade de calibração individual de cada sensor e a utilização de tensão de alimentação de 5 V para estimativas acuradas da umidade volumétrica nos solos avaliados. O custo necessário para implantação do sistema de automação em Arduino para irrigação do ambiente protegido foi 30,2% inferior em comparação a um sistema convencional de automação.

Palavras-chave: automação de irrigação, hortaliças, Arduino, tensão de água no solo

GENERAL ABSTRACT

Currently, a large amount of water resources is used in agriculture, however, efficient irrigation management techniques are still incipient in the context of small farms. To face this challenge, irrigation management with simple and accessible methodologies can contribute to reducing de problems associated to waste of water in irrigation. This study aimed to develop and evaluate electronic systems for application in irrigation automation in Lettuce and soil moisture monitoring. For this purpose, the major devices used were the electronic tensiometer with pressure transducers and capacitive soil moisture sensors. The irrigation automation system was developed with integration between relay modules, data logger, electronic tensiometers, and other components with the Arduino microcontroller. The electronic tensiometers were evaluated in irrigation automation by monitoring critical matric potentials for lettuce (*Lactuca sativa* L.), cultivar Wanda, grown in a protected environment in 10 L packages filled with Red-Yellow Latosol (LVA) and Regolitic Neosol (NR). The experimental design was a complete randomized block, consisting of two types of soil and eight levels of critical matric potentials in the soil, being -15, -20, -25, and -30 kPa for LVA and -10, -15, -20, and -25 kPa for NR. The irrigation system was activated when the electronic tensiometers reading the pre-established critical matric potentials. The irrigation shutdown occurred when the system applied a water depth necessary to raise the soil moisture to the matric potential of -10 kPa for all LVA critical potentials and -5 kPa for all NR critical potentials. The crop responses evaluated were the number of leaves (NF), stem height (AC), stem diameter (DC), fresh weight of aerial part and roots (MFPA, MFR), dry mass of aerial part and roots (MSPA, MSR), chlorophyll index and water use efficiency. Also, nine capacitive soil moisture sensors used in the Arduino platform were evaluated to estimate the volumetric soil moisture in deformed samples of LVA, NR, and Red Latosol (LV). The sensors were evaluated for their accuracy and precision in estimating the volumetric moisture from saturation to residual moisture content. Finally, a cost analysis of the proposed system was carried out compared to an automation model with conventional equipment available on the market. The use of the moving average in the readings of electronic tensiometers was efficient in the maintenance of the irrigation automation within the potential thresholds adopted in LVA and NR, with a maximum variation of 4.7 and 3.9% in the activation in LVA and NR, respectively and of 23.1 and 15.4% in disconnection in LVA and NR, respectively. The critical potential of -10 kPa in NR resulted in greater growth of the aerial part and

development of lettuce roots associated with a EUA of 0.44 g mm^{-1} whereas in LVA the potential of -15 kPa resulted in a EUA of 1.31 g mm^{-1} but with less growth of the aerial part and roots when compared to results in NR. Critical potentials above -15 kPa in NR result in a reduction of 50% in EUA and the growth of the crop is severely reduced. The critical potentials adopted in LVA did not result in significant differences between most of the characteristics evaluated in the lettuce cultivated in pots. The critical potential of -10 kPa in NR resulted in the best crop responses among the potentials adopted in both soil types. The evaluation of the capacitive sensors resulted in specific calibrations for each soil type, where the RMSE was 0.08, 0.12, and $0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, for LVA, NR and LV, respectively. The reading variability between sensors indicates the need for individual calibration of each sensor and the use of a 5 V supply voltage for accurate estimates of volumetric soil moisture in the three types of soils evaluated. The cost required to implement the automation system in Arduino for irrigation of the protected environment was 30,2% lower compared to a conventional automation system.

Keywords: irrigation automation; vegetables, Arduino, soil water tension

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	VI
GENERAL ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABELAS	XVI
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	XVIII
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo geral	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Cenário da produção de alface	21
3.2 Manejo de irrigação na cultura da alface.....	21
3.3 Manejo de irrigação em função da umidade do solo.....	22
3.3.1 Método da tensiometria.....	22
3.3.2 Método da capacitância.....	26
3.4 Automação da irrigação.....	27
3.5 Plataforma de prototipagem eletrônica Arduino	28
4 REFERÊNCIAS.....	31
CAPÍTULO I.....	39
5 AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR TENSIOLOGIA ELETRÔNICA EM DOIS TIPOS DE SOLO BASEADA NA PLATAFORMA DE HARDWARE ARDUINO	40
5.1 RESUMO	40
5.2 ABSTRACT	40
5.3 INTRODUÇÃO	41
5.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
5.4.1 Caracterização físico-hídrica do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR).....	43

5.4.2	Monitoramento do potencial matricial em LVA e NR e armazenamento das informações.....	44
5.4.3	Construção do tensiômetro eletrônico.....	47
5.4.4	Componentes e funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento.....	49
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.6	CONCLUSÕES	60
5.7	REFERÊNCIAS	60
CAPÍTULO II		63
6	TENSIÔMETROS ELETRÔNICOS INTEGRADOS A PLACA A ARDUINO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA ALFACE EM DIFERENTES POTENCIAIS MATRICIAIS CRÍTICOS E TIPOS DE SOLO	64
6.1	RESUMO	64
6.2	ABSTRACT	64
6.3	INTRODUÇÃO	65
6.4	MATERIAL E MÉTODOS	66
6.4.1	Local do experimento.....	66
6.4.2	Caracterização físico-hídrica e química do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR) e preparo das embalagens de cultivo.....	67
6.4.3	Delineamento experimental e adubação	68
6.4.4	Caracterização físico-hídricas dos solos	69
6.4.5	Sistema de irrigação	70
6.4.6	Sistema de automação e monitoramento de variáveis micrometeorológicas e potenciais matriciais do solo	70
6.4.7	Parâmetros fenométricos da alface, eficiência do uso da água e índice Falker de clorofila total	72
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
6.5.1	Sistema de automação da irrigação e variáveis micrometeorológicas	73
6.5.2	Parâmetros fenométricos da alface	76

6.5.3	Eficiência do uso da água.....	78
6.5.4	Índice de clorofila	79
6.5.5	Análise de componentes principais.....	80
6.6	CONCLUSÕES	82
6.7	REFERÊNCIAS	83
CAPÍTULO III.....		87
7	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE EM TRÊS TIPOS DE SOLO DO CERRADO	88
7.1	RESUMO	88
7.2	ABSTRACT	88
7.3	INTRODUÇÃO	89
7.4	MATERIAL E MÉTODOS	91
7.4.1	Sensor capacitivo e plataforma Arduino	91
7.4.2	Amostras de solo e corpos de prova.....	92
7.4.3	Análise da variabilidade entre sensores	94
7.4.4	Calibração e validação dos sensores capacitivos	95
7.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
7.5.1	Variabilidade entre sensores	95
7.5.2	Calibração dos sensores capacitivos	97
7.5.3	Validação da calibração	100
7.6	CONCLUSÕES	102
7.7	REFERÊNCIAS	103
8	APÊNDICE	105
PROGRAMAÇÃO UTILIZADA PARA CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO IDE ARDUINO V.1.8.9.		105
PROGRAMAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO EM FUNÇÃO DE POTENCIAIS MATRICIAIS CRÍTICOS		105

PROGRAMAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE
DO SOLO MONITORADA POR SENSORES CAPACITIVOS SKU:SEN0193 113

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 5-1.** Módulo para calibração de transdutores de pressão..... 46
- Figura 5-2.** Protótipo de tensiômetro eletrônico (A) e tensiômetro eletrônico instalado em embalagem com solo (B). 48
- Figura 5-3.** Ligação elétrica dos componentes do sistema da automação de irrigação por tensiometria eletrônica. 49
- Figura 5-4.** Sistema de bombeamento (A) com filtro de discos de 130 micra (1) Motobomba monofásica, 1/3 CV, afogada (2), manômetro com glicerina para medir pressão na saída da bomba (3) e reservatório de 1000 L (4). Componentes do sistema de automação da irrigação (B) com placa Arduino (5), módulos relés (6), módulo data logger (7), módulo RTC (8), fonte reguladora de tensão (9), regulador de pressão (10). Visão geral do sistema de irrigação e cultivo (C). 50
- Figura 5-5.** Curva experimental de calibração do transdutor MPX5700DP (A). Leitura dos tensiômetros eletrônicos sem aplicação de média móvel (Trecho 1) (B) e com aplicação de média móvel (Trecho 2) (B)..... 53
- Figura 5-6.** Variação média do potencial matricial dos tensiômetros eletrônicos em função do tempo, em dias, para o LVA/E1 (A) e NR/E1 (B) e eventos de acionamento da irrigação (Δ). As linhas horizontais representam os potenciais críticos de acionamento (tracejado superior) e capacidade de campo (tracejado inferior) para os controles LVA/E1 (- 20 kPa/- 10 kPa) e NR/E1 (-10 kPa/- 5 kPa). 55

CAPÍTULO II

- Figura 6-1.** Vista interna da casa de vegetação e componentes de arrefecimento evaporativo do ar..... 67
- Figura 6-2.** Disposição geral das embalagens e tensiômetros eletrônicos (A); detalhe do tensiômetro eletrônico instalado no interior da embalagem (B). 71
- Figura 6-3.** Variação média diária da temperatura do ar e umidade relativa do ar durante o ciclo..... 73
- Figura 6-4.** Variação média diária do potencial matricial registrado em tensiômetros eletrônicos ao longo do ciclo da alface em LVA (A) e NR (B). 74

Figura 6-5. Índices Falker de clorofila a (CLA), clorofila b (CLB) e clorofila total (CLT) para o LVA (A) e NR (B), em função dos potenciais críticos de reposição hídrica em alface cultivada em ambiente protegido.	80
Figura 6-6. Dispersão (gráfico <i>biplot</i>) dos PMc's em LVA e NR. MSPA: Massa seca da parte aérea; MFPA: Massa fresca da parte aérea; DP: Diâmetro de plantas; NF: Número de folhas; DC: Diâmetro de caule; AC: Altura de caule; MSR: Massa seca de raízes; MFR: Massa fresca de raízes.....	82

CAPÍTULO III

Figura 7-1. Conexão entre os sensores capacitivos SKU:SEN0193 de 3,3 e 5,0 V com a placa microcontroladora Arduino MEGA 2560.	91
Figura 7-2. Sensores capacitivos SKU:SEN0193 instalados nos corpos de prova preenchidos com Neossolo Regolítico (A), Latossolo Vermelho (B) e Latossolo Vermelho Amarelo (C). 93	
Figura 7-3. Equações de calibração para os sensores capacitivos em LVa 3,3 v (A), NR 3,3 v (B) e LV 5,0 v (C). S1: Sensor 1; S2: Sensor 2; S3: Sensor 3. **Significativo a $p < 0,01$; * significativo a $p < 0,05$	99
Figura 7-4. Validação da calibração aplicada aos sensores instalados em amostras deformadas de Latossolo Vermelho Amarelo (A), Neossolo Regolítico (B) e Latossolo Vermelho (C).	101

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 5-1. Propriedades físicas e granulométricas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR).....	43
Tabela 5-2. Equações ajustadas das curvas de retenção de água no solo conforme Van Genuchten, umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) para o LVA e NR.	44
Tabela 5-3. Valores de potenciais de acionamento da irrigação (PotA), potencias ao término da irrigação (PotP), desvio padrão (DesvP), coeficiente de variação (CV), número de acionamentos da irrigação (NAI), lâmina aplicada (LA) para quatro embalagens (E) com LVA e NR.	56
Tabela 5-4. Custo total médio para automação da irrigação de uma estufa de 30 x 13 m utilizando os componentes propostos no sistema de programação com Arduino e com equipamentos convencionais.....	57

CAPÍTULO II

Tabela 6-1. Características físicas e granulométricas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR).	68
Tabela 6-2. Qualidade química do solo na camada de 0-0,20 m do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR).	68
Tabela 6-3. Adubação realizada nas embalagens preenchidas com LVA e NR.	69
Tabela 6-4. Equações ajustadas das curvas de retenção de água no solo conforme Van Genuchten, umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) para o LVA e NR.	70
Tabela 6-5. Potenciais matriciais médios de acionamento da irrigação (PMA), potenciais matriciais médios de interrupção da irrigação (PMi), desvio padrão (SD) e coeficiente de variação (CV) para os potenciais matriciais críticos (PMc) no LVA e NR.....	75
Tabela 6-6. Número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), altura de caule (AC) e diâmetro de planta (DP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca de raízes (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) para os potenciais matriciais críticos (PMc) em LVA e NR.	77

Tabela 6-7. Potenciais críticos de reposição hídrica (PMc), umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}), umidade no potencial crítico (Θ_{pc}), lâmina aplicada por evento de irrigação (LI), lâmina de irrigação aplicada antes (Inicial) e após diferenciação dos tratamentos (Irrigação), lâmina total aplicada (Total), número total de irrigações (NI) e eficiência do uso da água (EUA) em alface cultivada em embalagens preenchidas com LVA e NR em ambiente protegido.	79
Tabela 6-8. Análise de componentes principais dos parâmetros fenométricos da alface em todos os PMc's avaliados em LVA e NR.	81

CAPÍTULO III

Tabela 7-1. Propriedades físicas e granulométricas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVa), Neossolo Regolítico (NR) e Latossolo Vermelho (LV).....	94
Tabela 7-2. Equações utilizadas para obtenção do coeficiente de variação (CV) e coeficiente de correlação de Spearman para análise da variabilidade entre sensores capacitivos SKU:SEN0193 em ar, água destilada e amostras deformadas de LVa, NR e LV.	94
Tabela 7-3. Índices estatísticos para avaliação da acurácia dos modelos de calibração.	95
Tabela 7-4. ANOVA e coeficiente de variação (CV) de V_{out} do sensor SKU:SEN0193 de 3,3 V_{in} e 5,0 V_{in} obtidos em ar a 26 °C a e água destilada a 24 °C.	96
Tabela 7-5. Coeficiente de correlação de Spearman (r_s) entre a voltagem de saída (V_{out}) dos sensores e a variação da umidade volumétrica (Θ) em amostras deformadas de LVa, NR e LV.	97
Tabela 7-6. Índices estatísticos de acurácia para os sensores avaliados em amostras deformadas de LVa, NR e LV, coeficiente de determinação (R^2), Erro Médio Absoluto (MAE [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]) e Erro Quadrático Médio (RMSE [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]).....	102

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, cerca de 70% da água captada de fontes superficiais e subterrâneas é usada para irrigação, porém, em grande parte das propriedades rurais, o manejo de irrigação é realizado de maneira subjetiva com observações alheias a aspectos técnicos necessários para o uso racional da água. Como consequências da irrigação excessiva, pode-se ter a perda de água por escoamento superficial e infiltração profunda, com potencial de contaminação das águas superficiais e subsuperficiais, além do agravamento de conflito de uso de água com outros setores de usuários. Diante desse cenário, o manejo eficiente de irrigação, com metodologias de baixo custo é um dos caminhos viáveis para a utilização racional da água na produção agrícola (Bitella et al., 2014; Thalheimer, 2013).

O cultivo de hortaliças é crítico no que se refere à irrigação, uma vez que os produtores tentam, cuidadosamente, evitar a irrigação abaixo da necessidade hídrica da cultura, porém, com esse objetivo e sem acesso a informações técnicas acabam irrigando em excesso, o que torna a atividade onerosa e muitas vezes diminui a qualidade do produto (Sousa et al., 2011). O cultivo de hortaliças em estufas tem crescido nas últimas décadas, nesse sistema a produção de vegetais possui menor impacto ambiental em comparação com o cultivo em campo. O cultivo da alface, dentre outras hortaliças, é afetado pelas intempéries do clima, o que pode diminuir a oferta do produto. Para manter a regularidade de oferta do produto durante todo o ano, o cultivo em ambiente protegido pode ser uma alternativa viável em relação ao cultivo convencional (Valeriano et al., 2016).

Assim, em condições de ambiente protegido, a utilização de sensores para a medição do estado da água no solo juntamente com a seleção de métodos de irrigação integrados a medições em tempo real tem mostrado resultados significativos na melhoria da eficiência do uso da água no cultivo da alface (Chen et al., 2019). Nesse sentido, o uso sustentável de água na agricultura irrigada tem levado ao aumento de investimentos em técnicas voltadas à irrigação de precisão. O conceito de irrigação de precisão é baseado no monitoramento de variáveis que determinam a demanda hídrica das culturas, seja em tempo real ou em medições que podem ser registradas e utilizadas para acionar a irrigação a partir de um teor crítico de umidade no solo, específico para cada cultura e sistema de irrigação (Hedley et al., 2013).

No campo da irrigação de precisão, o conhecimento do conteúdo de umidade do solo é extremamente importante, pois se espera que a transpiração das plantas diminua com a redução do conteúdo de água do solo (Seyfried & Murdock, 2004). Além disso, o monitoramento simultâneo de dados de solo, ambiente e vegetação pode ser utilizado na

avaliação não destrutiva da produtividade, bem como em estratégias voltadas à prevenção e quantificação do estresse hídrico em culturas agrícolas (Witerhalter et al., 2011).

O monitoramento da umidade do solo pode ser realizado a partir de diferentes técnicas, dentre elas a utilização do tensiômetro, que se baseia na aplicação do potencial matricial do solo que descreve a contribuição das forças de retenção da solução no solo associadas com suas interfaces líquido-ar e sólido-líquido, sendo, portanto, relacionado com o conteúdo de água no solo (Libardi, 2012). O conteúdo de água no solo correspondente ao potencial matricial varia amplamente entre os solos, dependendo da textura e conteúdo de matéria orgânica. O tempo de resposta do tensiômetro depende da condutividade hidráulica da cápsula porosa e da sensibilidade do seu dispositivo de leitura de sucção interna (Lal & Shukla, 2004). A curva de retenção de água no solo representa a relação física entre a umidade e o potencial matricial, o qual expressa a energia com a qual a água está retida no solo. A capacidade de um solo em armazenar e disponibilizar água para o crescimento e desenvolvimento das plantas está diretamente relacionada a esse atributo físico-hídrico (Soares et al., 2014).

Existem diversos sensores industriais de umidade do solo no mercado, no entanto, o alto custo de aquisição e a complexidade de operação dificultam sua adoção em escala na produção agrícola. Esse contexto tem levado a um desenvolvimento progressivo de instrumentos alternativos de baixo custo, que possibilitam o aumento da frequência de medições necessárias para uma maior representatividade do conteúdo de água do solo no ambiente de cultivo (Mahan & Yeater, 2008; O'shaughnessy et al., 2011).

Assim, como alternativa aos sensores industriais de umidade do solo, têm emergido nos últimos anos os sensores de umidade compatíveis com a placa micro controladora de código aberto Arduino (Bitella et al., 2014). Estes sensores atuam na estimativa indireta da umidade do solo e tem como principais opções no mercado sensores de princípio resistivo e capacitivo (Nath et al., 2018; Nagahaje et al., 2019). Tensiômetros adaptados com dispositivos eletrônicos de leitura de sucção interna já têm sido integrados ao controlador Arduino em diversos estudos de monitoramento da umidade do solo e mais recentemente, em sistemas de automação de irrigação (Thalheimer, 2013; Arruda et al., 2017; Pereira et al., 2020).

As plataformas construídas em Arduino são protótipos eletrônicos de livre acesso com ampla difusão em pesquisas e aplicações desenvolvidas em várias áreas do conhecimento (Leeuw et al., 2013; Masseroni et al., 2016, Silva et al., 2020). Os sensores e outros

componentes que integram a plataforma Arduino de prototipagem eletrônica são facilmente obtidos no mercado, seja por lojas especializadas ou sites de venda *on line*.

Protótipos voltados à irrigação de culturas agrícolas baseados em prototipagem eletrônica, seja com Arduino ou outros microcontroladores têm sido desenvolvidos nos últimos anos (Almeida et al., 2017; Arvindan & Keerthika, 2016; Bitella et al., 2014), entretanto, as aplicações ainda apresentam características com pouco rigor técnico-científico e carecem de resultados que demonstrem quantitativamente sua eficiência na estimativa da umidade do solo, na automação de um sistema de irrigação, bem como no resultado agrônômico de sua adoção em uma cultura cultivada em ambiente protegido.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Construir e avaliar um sistema de automação de irrigação tendo como referência a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino a partir do monitoramento de potenciais matriciais críticos para reposição hídrica à cultura da alface em ambiente protegido e em dois tipos de solo, bem como avaliar o sensor SKU:SEN0193 quanto a sua precisão e acurácia na estimativa da umidade de três diferentes tipos de solo.

2.2 Objetivos específicos

- Utilizar transdutores de pressão como mecanismos de leitura em tensiômetros para o monitoramento do potencial matricial do solo.
- Avaliar a aplicação do microcontrolador Arduino na operação e armazenamento dos dados obtidos por tensiômetros eletrônicos, sensores de umidade e temperatura do ar, bem como o acionamento de relés e válvulas solenoides para o controle do sistema de irrigação.
- Estabelecer relações entre a frequência de irrigação e o volume de água aplicados em Latossolo Vermelho amarelo e Neossolo Regolítico com variáveis de crescimento e componentes de produção da alface cultivada em embalagens em ambiente protegido.
- Estimar a eficiência do uso da água para a alface em função da lâmina de irrigação aplicada a partir dos potenciais matriciais críticos adotados em LVA e NR.

- Realizar a calibração e validação de sensores capacitivos utilizados na plataforma Arduino para estimativa da umidade em três tipos de solo da região do Cerrado.
- Realizar comparação de custos entre implementação do sistema de automação com Arduino com sistema de automação convencional.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cenário da produção de alface

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma planta anual, originária de clima temperado, pertencente à família Asteracea, sendo uma das hortaliças mais consumidas no Brasil e no mundo. Praticamente todas as cultivares se desenvolvem bem em climas amenos, principalmente no período vegetativo. A ocorrência de temperaturas mais elevadas acelera o ciclo da cultura e, dependendo do genótipo, pode resultar em plantas menores devido ao pendoamento precoce (Filgueira, 2005).

A alface do tipo crespa produz uma cabeça esférica firme que pode pesar entre 700 e 1000 g. As primeiras folhas são alongadas no estágio de roseta e aumentam gradualmente em largura até que se tornem mais largas do que longas na maturidade. Cabeças muito maduras podem produzir folhas muito duras e que se rompem, resultando em um sabor amargo. As folhas externas são verdes brilhantes ou verdes opacas e a cor do interior muda progressivamente de verde mais claro para amarelo esbranquiçado ou cremoso em direção ao centro (Mou, 2008).

Segundo informações do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2020), a cultura da alface no Distrito Federal em 2017 teve produção de 16.134 ton em 719 estabelecimentos rurais. Em termos de custo, a alface cultivada em sistema convencional de aspersão tem um custo total por hectare de R\$ 21.508,36 para uma produtividade esperada de 3000 cx/8 kg ha⁻¹ (EMATER-DF, 2020).

3.2 Manejo de irrigação na cultura da alface

Diferentes estratégias de manejo de irrigação têm sido aplicadas na cultura da alface, como a partir da estimativa da evapotranspiração da cultura, variação do turno de rega, variação da umidade do solo em função da umidade ótima para a cultura, adoção de potenciais matriciais críticos com reposição da umidade em valores abaixo ou no potencial na

capacidade de campo (Guimarães et al., 2019; Dlamini & Zwane, 2020; Eriksen et al., 2020; Ferreira, 2015; Geisenhoff et al., 2016).

A alface é muito sensível à escassez de água no solo, no entanto, a aplicação de irrigação em déficit de forma controlada apesar de afetar o número de folhas, índice de área foliar e acúmulo de matéria seca, pode melhorar a eficiência do uso da água pela cultura (Malejane et al., 2018). Em um sistema de automação de irrigação em vasos ajustado para acionamento no potencial de - 6 kPa, Valença et al. (2018), concluíram que a reposição hídrica em 33% da demanda hídrica da cultura causa uma redução de aproximadamente 70% no peso seco da parte aérea da alface.

Devido à ocorrência de fungos do solo e nematoides, o cultivo em vasos ou embalagens têm se mostrado como uma alternativa para cultivos comerciais, porém trata-se de um sistema de cultivo com poucos estudos relacionados ao manejo de irrigação (Silva et al., 2018). Além disso, a planta cultivada em vaso responde ao regime hídrico de forma diferente à planta cultivada em campo, devido à diferença da distribuição das raízes com a profundidade. Segundo Hillel (1998), em condições de cultivo no campo, as raízes crescem em diferentes direções e espaçamentos, de modo que se torna difícil estabelecer os gradientes de fluxo de água na região radicular. Além disso, o padrão de extração de água não corresponde necessariamente ao padrão de distribuição de raízes, uma vez que em qualquer momento algumas raízes podem apresentar maior absorção de água do que outras e algumas regiões do solo na zona radicular podem apresentar uma redistribuição da umidade de forma mais rápida do que outras, nesse sentido, o cultivo em vasos pode facilitar o controle da irrigação por ser capaz de minimizar os efeitos espaço-temporais do processo de extração de água do solo pelas raízes.

3.3 Manejo de irrigação em função da umidade do solo

3.3.1 Método da tensiometria

Um dos conceitos que definem o sistema solo-planta-atmosfera é o de que a água flui espontaneamente de regiões de maior energia potencial para regiões onde essa energia é menor (Sezen et al., 2014, Libardi, 2012). A água do solo como outros corpos da natureza, pode conter energia em quantidades e formas variadas. A física clássica reconhece duas formas principais de energia da água, cinética e potencial. Como o movimento da água no solo é bastante lento, sua energia cinética é geralmente negligenciada. Por outro lado, a

energia potencial, que é devido à posição ou condição interna, é de primordial importância na determinação do estado e movimento da água no solo (Hillel, 1998).

Em geral, a energia livre da água pode ser influenciada por quatro principais fatores: concentração, pressão, forças de superfície e coloidais (potencial matricial) e gravidade. Assim, é possível representar o potencial hídrico (ψ_w) com os seguintes componentes:

$$\psi_w = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

Os termos ψ_s , ψ_p , ψ_m e ψ_g denotam os efeitos do potencial osmótico (solutos), potencial de pressão, potencial matricial e potencial gravitacional, respectivamente, sobre a energia livre da água. O estado de referência ou potencial hídrico padrão foi estabelecido como zero. Assim, os fatores acima podem aumentar ou diminuir o potencial hídrico, ou seja, a energia livre capaz de realizar trabalho (Papendick & Campbell, 1980).

Para se determinar o momento adequado de se irrigar, o conhecimento da “energia” com que a água é retida no solo (potencial matricial) é geralmente mais importante do que o conhecimento da quantidade de água disponível no solo, já que, um solo pode conter umidade, porém esta pode estar fortemente retida devido às forças de adsorção da matriz do solo, o que dificulta sua extração pelas raízes (Marouelli, 2008). O manejo da irrigação via potencial matricial consiste em irrigar no momento em que a energia potencial da água no solo atinja um valor crítico que não cause estresse às plantas e não prejudique sua produção. Para a alface irrigada por gotejamento, alguns trabalhos têm mostrado que o potencial crítico, medido por tensiômetros a 0,30 m de profundidade, varia entre -6 kPa em solo de textura arenosa a -10 kPa em solo de textura média, enquanto que para solos de textura argilosa o potencial crítico pode chegar a -20 kPa a 0,15 m de profundidade (Bianchi et al, 2017). Como regra geral, as faixas de potencial matricial podem ser interpretadas da seguinte maneira (Marouelli, 2008):

- 0 a -10 kPa: Solo próximo à saturação. Leituras contínuas nessa faixa indicam irrigações em excesso, perda de água por drenagem profunda e deficiência de aeração para as raízes.
- -10 a -20 kPa: Solo com excelente condição de umidade e aeração. Faixa de potencial indicada para hortaliças altamente sensíveis ao déficit hídrico, solos arenosos e/ou irrigação por gotejamento.
- -20 a -40 kPa: Solo com boa condição de umidade e excelente aeração. Faixa de potencial indicada para hortaliças sensíveis ao déficit hídrico.

- -40 a -70 kPa: Solo com limitada condição de umidade e excelente aeração. Faixa de potencial indicada para hortaliças com tolerância moderada ao déficit hídrico.
- < -70 kPa: Solo com baixa disponibilidade hídrica e excelente aeração, praticamente fora do limite de funcionamento do tensiômetro. Condição indicada apenas para hortaliças altamente tolerantes ao déficit hídrico e/ou estádios definidos de desenvolvimento de culturas específicas.

A umidade e o potencial matricial do solo são funcionalmente relacionados entre si e a representação gráfica dessa relação é a curva característica de retenção de água no solo (van Genuchten, 1980). Tanto a umidade quanto o potencial matricial possuem alta variabilidade no tempo e no espaço, uma vez que o solo é reidratado pela chuva, drenado por gravidade e seco por evaporação e extração de água pelas raízes das plantas.

Com o objetivo de avaliar o monitoramento da umidade do solo com sensores de potencial matricial, Vellidis et al. (2008), apresentaram um conjunto formado por um mecanismo receptor sem fio ligado a um laptop e sensores de potencial matricial do tipo blocos de gesso resistivos Watermark[®] (Irrometer Co., Riverside, CA, USA) e termopares espalhados em uma área de 2,3 ha cultivada com algodão e irrigada por pivô central. O planejamento da irrigação foi realizado a partir da adoção de um limiar de potencial matricial a 0,20 m de profundidade (-40 kPa) ou quando o potencial atingia -50 kPa nas profundidades de 0,40 ou 0,60 m, onde, então se irrigou até o reestabelecimento do potencial a -10 kPa. Na comparação com a área onde a irrigação foi realizada com base no conhecimento empírico do operador, os autores verificaram que o manejo via potencial matricial manteve os potenciais dentro dos limiares adotados, enquanto que na área irrigada pelo modo empírico os potenciais atingiram valores de até -100 kPa na profundidade de 0,10 m e a lâmina de água aplicada muitas vezes não foi capaz de reestabelecer o potencial até -10 kPa.

O tensiômetro é o equipamento utilizado para a medição direta do potencial matricial e é geralmente constituído de um tubo de polietileno de vinil (PVC) ou de acrílico selado, sendo que numa extremidade fixa-se uma cápsula de cerâmica porosa, a qual é inserida no solo. Os modelos de tensiômetros mais utilizados são os de vacuômetros metálicos tipo Bourdon, de coluna de mercúrio e de punção. As unidades de medida dos vacuômetros são geralmente expressas em kPa, cbar, mmHg e cmH₂O, onde 1 kPa = 1 cbar = 7,5 mmHg = 10,2 cmH₂O (Marouelli, 2008). Os tensiômetros com vacuômetro de mercúrio, apesar de apresentarem

excelente precisão, utilizam mercúrio metálico, o que os tornam menos seguros do ponto de vista ambiental e por isso devem ser evitados.

Ao ser inserido no solo, na profundidade desejada, o tubo do tensiômetro é preenchido com água e vedado. Se o potencial matricial do solo estiver baixo (mais negativo) comparativamente ao potencial da água no interior do tensiômetro, esta irá se mover para o solo, criando um vácuo parcial interno, o qual é equivalente ao potencial da água no solo. Esse movimento irá continuar até que seja atingido um valor de equilíbrio (Dobriyal et al., 2012). Apesar do baixo custo, o uso dos tensiômetros ainda apresenta restrições técnicas como a necessidade de constante observação *in-loco* e manutenção frequente (Braga & Calgaro, 2010). Uma inconveniência frequentemente mencionada se trata da faixa de operação dos tensiômetros que se situa entre 0 e -80 kPa. Tal limitação não é um problema crítico, pois, para várias culturas, a faixa ótima de umidade do solo situa-se dentro desse limite, além do que, cerca de 30% a 60% da água disponível do solo está retida acima de -80 kPa (Bianchi et al., 2017).

Em relação à operação dos tensiômetros, transdutores de pressão têm sido testados como dispositivos de leitura do vácuo parcial interno (Arruda et al., 2017), pois possibilitam de forma prática e a um custo reduzido o fornecimento de leituras automáticas do potencial matricial do solo, além de permitir a integração das medições a sistemas de automação no manejo de irrigação (Almeida et al., 2017). Sistemas comerciais têm sido disponibilizados no mercado, porém com custos elevados e de difícil operação. A funcionalidade da utilização dos transdutores de pressão em tensiômetros tem sido mostrada em estudos de monitoramento do potencial matricial do solo com o emprego de sistemas de hardware e software de código aberto.

Thalheimer, (2013) utilizou tensiômetros com transdutores de pressão modelo MPX5100DP no monitoramento do potencial matricial em cultivo de macieira na região da Itália e instalados na profundidade de 0,25 m durante um período de 6 semanas. Os tensiômetros foram integrados ao microcontrolador Arduino alimentado por placa fotovoltaica e foram capazes de realizar o monitoramento contínuo do potencial matricial do solo entre -10 e -35 kPa onde, registraram a dinâmica de extração da água do solo pelas plantas e reposição de água no solo a partir das irrigações e precipitações que ocorreram na área monitorada. Arruda et al. (2017) apresentaram um sistema em Arduino capaz de realizar o monitoramento e armazenamento dos dados de 16 tensiômetros eletrônicos simultaneamente.

3.3.2 Método da capacitância

A umidade é um componente do sistema trifásico do solo, que compreende os minerais do solo (sólidos), água e ar. Portanto, o conteúdo de água no solo tem influência significativa na engenharia, agricultura, geologia, ecologia, biologia e comportamento hidrológico da massa de solo (Lekshmi et al., 2014). As medições de umidade do solo são operacionalmente complexas e de difícil abrangência espaço temporal. Métodos não destrutivos podem ser utilizados para estimar o conteúdo de água no solo de forma precisa e com maior resolução (Dobriyal et al., 2012). A precisão e acurácia desses métodos variam conforme a sofisticação da técnica empregada. Exemplos de métodos para a medida do conteúdo de água no solo são o termogravimétrico, a termalização de nêutrons e o grupo de técnicas baseadas na medição das propriedades dielétricas do solo. O termogravimétrico é tido como o de referência, pois é o único que pode determinar de forma direta o conteúdo de água no solo a partir da pesagem de amostras de solo úmidas e após secagem em estufa a 105 °C por 24 h. Os sensores dielétricos exploram as mudanças nas propriedades dielétricas do solo em função do conteúdo de água, a técnica de espalhamento de nêutrons é baseada na perda de energia de nêutrons à medida que colidem com outros átomos, em particular, o hidrogênio contido na molécula de água (Bitelli, 2011).

A permissividade dielétrica de um material (ϵ_r) é uma medida da tendência de suas moléculas em se orientarem na direção de um campo de força eletrostática. Devido ao fato de a molécula da água ser inerentemente polar (lado positivo e lado negativo devido à orientação dos átomos de hidrogênio), sua permissividade dielétrica é alta. O valor da ϵ_r da água é de aproximadamente 80, enquanto que a dos sólidos do solo varia entre 4 e 8 e a do ar é próxima de 1. Portanto, em um solo composto por três fases (ar, água e solo) em frações variáveis, a ϵ_r é amplamente influenciada pelo conteúdo de água existente no meio (Hillel, 1998). Ou seja, essa alta permissividade permite que a eletricidade flua mais livremente aumentando a capacitância o que a torna uma boa medida da umidade do solo, uma vez que o impacto relativo da água na permissividade dielétrica aparente seja alto em relação aos demais constituintes do solo (Placidi et al., 2020).

Algumas das técnicas baseadas em métodos dielétricos são a reflectometria no domínio do tempo (TDR) e reflectometria no domínio da frequência (FDR). A maioria desses instrumentos operam enviando um sinal eletromagnético em uma sonda inserida no solo. O tempo necessário para alterar o sinal (FDR) ou a frequência (FDR) da onda refletida varia

com as propriedades dielétricas do solo, as quais são principalmente regidas pelo conteúdo de água ao redor das sondas (Cardenas-Laihalcar & Dukes, 2010).

Topp et al. (1980) observaram que parâmetros como textura, estrutura, sais solúveis, teor de umidade, temperatura, densidade e frequência de medição afetam a resposta dielétrica do solo. Após décadas de utilização, as desvantagens das sondas de capacitância ainda persistem na necessidade de calibração para garantir medições precisas do conteúdo de água no solo devido sua sensibilidade ao tipo de solo e outros fatores, como a salinidade e temperatura (Pizetta et al., 2017).

Sensores capacitivos de baixo custo utilizados na plataforma Arduino que operam no domínio da frequência (FDR) têm sido avaliados em diversos países em solos com diferentes texturas e densidades (Nagahaje et al., 2019; Placidi et al., 2020). O principal modelo utilizado nesses estudos é o sensor SKU:SEN193 de princípio capacitivo. Nos estudos mencionados as avaliações são realizadas em amostras deformadas de solos e em condições de laboratório, porém, sem considerar a variação total da umidade desde a saturação do solo até a umidade residual. No Brasil ainda não existem estudos voltados à avaliação deste sensor quanto a sua precisão e acurácia na estimativa da umidade volumétrica do solo, seja em condição de laboratório ou em campo.

3.4 Automação da irrigação

Romero et al. (2012), ao analisarem o estado da arte dos sistemas de automação de irrigação, ressaltam que o desafio da irrigação de precisão consiste em não somente buscar uma referência constante de umidade do solo, mas também buscar um volume ótimo de umidade no solo que se relacione com a variação da necessidade hídrica das plantas ao longo do seu ciclo.

Em um sistema de automação, a ideia chave consiste no conceito de *feedback*, que pode ser compreendido como um mecanismo, processo ou sinal que é operacionalizado como um controle de funcionamento do sistema (Zhu & Li, 2011). No campo da automação da irrigação, medições de variáveis do solo, planta e atmosfera relacionadas ao status hídrico da cultura podem fornecer as informações necessárias para o cálculo da lâmina de irrigação, tornando possível a programação do funcionamento do sistema para a reposição hídrica necessária (Romero et al., 2012).

Uma maneira usual de se implementar o controle da irrigação denomina-se controle de malha aberta, onde nenhuma medição em relação ao consumo hídrico das plantas é fornecida

para modificar os próximos acionamentos, ou seja, nenhum *feedback* é utilizado. Nessa classe de controle as decisões são tomadas com base no conhecimento do operador ou em uma programação de acionamento previamente estabelecida. O segundo caso consiste no sistema de controle de malha fechada, onde os controladores utilizam informações de variáveis que monitoram continuamente a resposta do ambiente ou da planta aos acionamentos anteriores e utilizam essa informação pra calcular a próxima lâmina de irrigação a ser aplicada (Boutraa et al., 2011).

Atualmente existem no mercado vários modelos de controladores de irrigação (Acclima®, Watermark®, Rain Bird®, Hunter®, etc.) que regulam o conteúdo de água no solo baseados em medidas realizadas por sensores e, portanto, operam como controladores de malha fechada. Estes controladores acionam a irrigação quando os sensores detectam leituras abaixo de um limiar pré-definido e desligam quando outro limiar é alcançado. Essa referência pode ser definida como um valor constante, baseado na capacidade de campo ou em relação à quantidade de água prontamente disponível às plantas (Mccarthy et al., 2011). Cardenas-Lailhacar et al. (2008) afirmam que estes sistemas são capazes de aumentar a eficiência de uso da água em relação aos sistemas baseados no tempo de funcionamento da irrigação, desde que os limiares de acionamento e desligamento sejam obtidos de forma adequada.

A maioria dos trabalhos relacionados a controladores de irrigação desenvolvidos na última década têm como premissa, o acompanhamento do conteúdo de água no solo, seja com a presença ou ausência de estratégias de otimização das aplicações de água ao longo do ciclo de cultivo (Cáceres et al., 2007; Boutraa et al., 2011). Estes dispositivos são de custo relativamente elevado, além de apresentarem a limitação da necessidade de um número considerável de sensores para garantir a representatividade espaço-temporal da umidade do solo. Com o intuito de reduzir de custos e viabilizar o monitoramento da umidade do solo como prática de manejo de irrigação, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a utilização de diferentes técnicas de monitoramento indireto da umidade do solo com utilização de sensores construídos ou adaptados, além de integração destes com microcontroladores de código aberto (Almeida et al., 2017; Arruda et al., 2017; Hedley et al., 2013).

3.5 Plataforma de prototipagem eletrônica Arduino

O microcontrolador Arduino é construído em uma placa de circuito impresso (PCI) integrada aos denominados *sockets*, os quais permitem uma rápida e fácil conexão a dispositivos periféricos (sensores, módulos, etc.) que podem utilizar comunicação analógica

ou digital em modo de entrada (*Input*) ou saída (*Output*) (Bitella et al., 2014). A interface entre os dispositivos periféricos é realizada a partir de um ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) que pode ser executado em um computador pessoal com sistema operacional Windows, Mac OS ou Linux, permitindo sua utilização tanto por programadores iniciantes quanto por desenvolvedores experientes.

Os microcontroladores analisam o mundo físico a partir dos sensores e executam ações no meio a partir dos atuadores. São exemplos de sensores, os transdutores de pressão, sensores de temperatura e umidade do ar, sensores de movimento, etc. Como atuadores cita-se os módulos relé, leds e servomotores (Masseroni et al. 2016). A placa Arduino pode ser conectada a uma placa PCB ou *protoboard* a qual permite a construção de circuitos para adaptar os diferentes sinais dos componentes integrados ao Arduino permitindo, assim, grande flexibilidade na construção de sistemas de controle (Koenka et al., 2014).

A utilização dos controladores de código aberto, como o Arduino, se popularizou a partir de aplicações que envolviam o desenvolvimento de pequenos robôs detectores de obstáculos, drones, impressoras 3D, instrumentos musicais, automação residencial e outros, tão logo, estudos científicos começaram se valer dos microcontroladores em diversas aplicações. Devarakonda et al. (2016), desenvolveram uma câmara de condicionamento operante para estudo do comportamento animal baseada no microcontrolador Arduino. Cain & Cross (2018), apresentaram um dispositivo GPS com data-logger desenvolvido em Arduino para estudos de telemetria em animais selvagens.

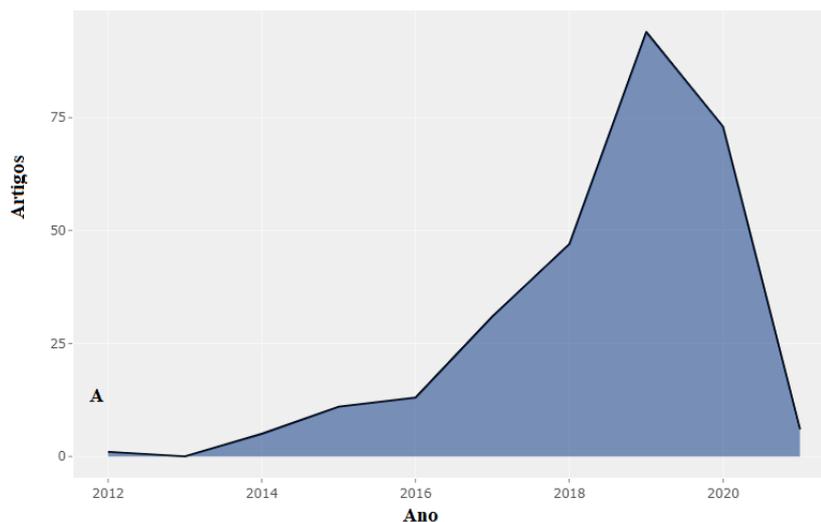
Carrascosa-Mesas et al. (2015) desenvolveram uma estação meteorológica alimentada por uma placa fotovoltaica na qual um microcontrolador Arduino foi integrado a sensores de temperatura e umidade do ar e temperatura e umidade do solo. A validação do dispositivo consistiu no acompanhamento das leituras realizadas pela estação em relação a estações meteorológicas automáticas instaladas próximas à estação. Os autores verificaram valores de RMSE para temperatura máxima, mínima e média do ar de 2,1 °C, 3,1 °C e 2,4 °C, respectivamente. Em relação à umidade relativa do ar os valores de RMSE foram de 6,1%, 6,2% e 6,9% para a umidade máxima, mínima e média, respectivamente.

Protótipos de sistemas de automação de irrigação envolvendo componentes da plataforma de prototipagem Arduino têm sido desenvolvidos nos últimos anos (Bitella et al., 2014; Arvindan & Keerthika, 2016), entretanto, carecem estudos que incluem os sistemas desenvolvidos onde se avalia a performance da irrigação em função da resposta da cultura em uma condição de cultivo pré-estabelecida, seja em ambiente protegido ou em campo aberto.

Outra questão recorrente a estes trabalhos é o fato de que os sensores utilizados no monitoramento da umidade do solo são geralmente baseados em princípios resistivos e não são devidamente calibrados considerando as variáveis envolvidas na determinação indireta da umidade do solo, como a textura, densidade, capacidade de retenção de água, etc.

Masseroni et al. (2016), apresentaram um dispositivo voltado ao manejo de irrigação que integra o microcontrolador Arduino a um conjunto de sensores de blocos resistivos. Na avaliação de campo o dispositivo foi instalado em uma área de pomar de pêras na região de Lodi – Itália, onde o manejo foi executado a partir da leitura do potencial matricial realizado pelo sistema. Em comparação com o manejo realizado com turno de rega fixo, o sistema com Arduino resultou em uma redução de 50% no consumo de água sem prejuízo da produtividade e qualidade da produção.

As Figuras 4-1A e 4-1B apresentam os resultados da análise bibliométrica realizada no pacote bibliometrix do *software* R. A análise consistiu na busca dos termos Arduino e Irrigação, resultando em um total de 281 publicações em todo o mundo entre os anos de 2012 e 2021, sendo divididas em 93 artigos, 176 resumos expandidos, 4 capítulos de livro e 8 artigos de revisão. A figura 4-1A apresenta a evolução de publicações ao longo dos anos onde se observa uma tendência de aumento de publicações a partir de 2014 com pico de 94 publicações em 2019. A Figura 4-1B apresenta uma figura *WordCloud* que destaca as palavras-chave de maior frequência nos estudos resultantes da análise bibliométrica. Destaca-se os termos *irrigation, soil moisture, moisture control* o que mostra a tendência dos estudos na busca de soluções de controle de irrigação que envolva o monitoramento da umidade do solo.



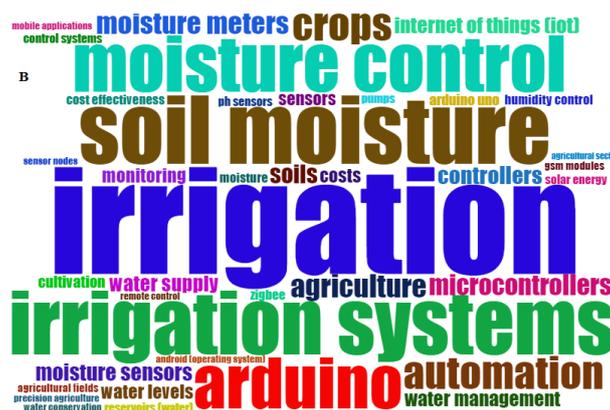


Figura 4-1 - Produção científica anual mundial de estudos que envolvem os termos Arduino e Irrigação (A). *Wordcloud* gerado a partir das palavras-chave de maior frequência nos estudos obtidos na análise bibliométrica (B).

4 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; RAINE, S. R.; CAMARGO, A. P.; PINTO, M. F.; SALVADOR, C. A. Irrigation controller mechanically actuated by soil-water tension: II – Field evaluations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.5, p.298-303, 2017.

ARVINDAN, A. N.; KEERTHIKA, D. Experimental investigation of remote control via android smart phone of Arduino-based automated irrigation system using moisture sensor. **Anais... 3rd International Conference on Electrical Energy Systems**, p.169-175, 2016.

ARRUDA, L. E. V.; FIGUEIRÊDO, V. B.; LEVIEN, S. L. A.; MEDEIROS, J. F. Desenvolvimento de um tensiômetro digital com sistema de aquisição e armazenamento de dados. **Irriga**, ed. Especial, IRRIGA & INOVAGRI, p.11-20, 2017.

BIANCHI, A.; MASSERONI, D.; THALHEIMER, M.; MEDICI, L. O. FACCHI, A. Field irrigation management through soil water potential measurements: a review. **Italian Journal of Agrometeorology**, v.2, n.2, p.25-38, 2017.

BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v. 14, p. 19639-1969, 2014.

BITELLI, M. Measuring soil water content: A review. **Horttechnology**, v.21, n.3, p.293-300, 2011.

BOUTRAA, T.; AKHKHA, A.; ALSHUAIBI, A.; ATTA, R. Evaluation of the effectiveness of an automated irrigation system using wheat crops. **Agriculture and Biology Journal of North America**, v.2, p.80-88, 2011.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. Uso da tensiometria no manejo da irrigação. **Circular técnica**, Embrapa Semiárido, 2010, 28p.

CÁCERES, R.; CASADESÚS, J.; MARFÀ, O. Adaptation of an automatic irrigation control tray system for outdoor nurseries. **Biosystems Engineering**, v.96, p.419–425, 2007.

CAIN, P. W.; CROSS, M. D. An open-source hardware GPS data logger for wildlife radio-telemetry studies: A case study using Eastern box turtles. **HardwareX**, v.3, p. 82-90, 2018.

CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Precision of soil moisture sensor irrigation under field conditions. **Agricultural Water Management**, v.97, p.666-672, 2010.

CARRASCOSA-MESAS, F. J.; SANTANO, D. V.; MEROÑO, J. E.; de la ORDEN, M. S.; GARCÍA-FERRER, A. Open-source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. **Biosystems Engineering**, v.137, p.73-83, 2015.

CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M.D.; MILLER, G.L. Sensor-based automation of irrigation on bermudagrass, during dry weather conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering** v.134, p.120-128, 2008.

CHEN, Z.; HAN, Y.; NING, K.; LUO, C.; SHENG, W.; WANG, S.; FAN, S.; WANG, Y.; WANG, Q. Assessing the performance of different irrigation systems on lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the greenhouse. **Plos One**, v.14, n.2, p.1-18, 2019.

DEVARAKONDA, K.; NGUYEN, K. P.; KRAVITZ, A. V. ROBucket: A low-cost operant chamber based on the Arduino microcontroller. **Behavior Research Methods**, v.48, n.2, p.503-509, 2016.

DLAMINI, M. V.; ZWANE, S. The effects of regulated deficit irrigation on the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in the Malkerns area, a region in the Kingdom of Eswanti (Southern Africa). **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, v.12, n.3, p.1-7, 2020.

DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**. v.458-459, p.110-117, 2012.

EMATER-DF Empresa de assistência técnica e extensão rural do Distrito Federal. **Custos de Produção**. Disponível em: www.emater.df.gov.br/custos-de-producao/. Acesso em: 27 de Dezembro de 2020.

ERIKSEN, R. L.; ADHIKARI, N. D.; MOU, B. Comparative photosynthesis physiology of cultivated and wild lettuce under control and low-water stress. **Crop Physiology & Metabolism**, v.60, p.2511-2526, 2020.

FERREIRA, J. E. Lettuce production in a greenhouse with drip fertigation fractioning. **Agropecuária Técnica**, v.36, n.1, p.136-145, 2015.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa, UFV, 2005, 412p.

GEISENHOF, L. O.; PEREIRA, G. M.; LIMA JUNIOR, J. A.; SILVA, A. L. P.; AVIZ, W. L. C. Produção de alface-americana em cultivo protegido utilizando mulching, sob diferentes tensões de água no solo. **Engenharia Agrícola**, v.36, n.1, p.46-54, 2016.

GUIMARÃES, C. M.; CUNHA, F. F.; SILVA, F. C. S.; ARAÚJO, E. D.; GUIMARÃES, A. B. F.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. J. H. Agronomic performance of lettuce cultivars submitted to different irrigation depths. **Plos One**, v.14, n.12, p.1-19, 2019.

HEDLEY, C. B. B.; ROUDIER, P.; YULE, I. J. J.; EKANAYKE, J.; BRADBURY, S. Soil water status and water table depth modelling using electromagnetic surveys for precision irrigation scheduling. **Geoderma**, v. 199, p. 22-29, 2013.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. Academic Press, 1998. 801p.

KOENKA, I. J.; SÁIZ, J.; HAUSER, P. C. Instrumentino: An open-source modular Python framework for controlling Arduino based experimental instruments. **Computer Physics Communications**, v.185, p.2724-2729, 2014.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. New York, Marcel Dekker, 2004, 682p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2 ed. São Paulo, 2012. 348p.

LEEuw, T.; BOSS, E.; WRIGHT, D. *In situ* measurements of phytoplankton fluorescence using low cost electronics. **Sensors**, v.13, p.7872-7883, 2013.

LEKSHMI, S. U. S.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v.54, p.92-105, 2014.

MAHAN, J. R.; YEATER, K. M.; Agricultural applications of a low-cost infrared thermometer. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.64, p.262-267, 2008.

MALEJANE, D. N.; TINYANI, P.; SOUNDY, P.; SULTANBAWA, Y.; SIVAKUMAR, D. Deficit irrigation improves phenolic content and antioxidant activity in leafy lettuce varieties. **Food Science & Nutrition**, v.6, p.334-341, 2018.

MAROUELLI, W. A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças. Circular técnica**, Embrapa Hortaliças, Brasília, 2008, 15p. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/ct_57_000gul1bce002wx7ha0g934vgbhujmjpg.pdf Acesso em 05 de setembro de 2018.

McCARTHY, A.; HANCOCK, N.; RAINE, S. Advanced process control for irrigation: the current state and an analysis to aid future development. **Irrigation Science**, p.1-10, 2011.

MASSERONI, D.; FACCHI, A.; DEPOLI, E. V.; RENGA, F. M.; GANDOLFI, C. Irrig-OH: An open-hardware device for soil water potential monitoring and irrigation management. **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 5, p. 1-12, 2016.

MESAS-CARRASCOSA, F. J.; SANTANO, D. V.; MEROÑO, J. E.; ORDEN, M. S.; GARCÍA-FERRER, A. Open-source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. **Biosystems Engineering**, v.37, p.73-83, 2015.

MOU, B. Lettuce. In. PROHENZ, J.; NUEZ, F. (Org.). **Vegetables I – Handbook of Plant Breeding**, New York: Springer, 2008, p.75-116.

NAGAJAJE, E. A. A. D.; NAGAJAJE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v.9, n.141, p.1-10, 2019.

NATH, S.; NATH, J. K.; SARMA, K. C. IoT based system for continuous measurement and monitoring of temperature, soil moisture and relative humidity. **International Journal of Electrical Engineering & Technology**, v.9, n.3, p.106-113, 2018.

O'SHAUGHNESSY, S. A.; HEBEL, M. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D. Evaluation of a wireless infrared thermometer with a narrow field of view. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.76, p.9-68, 2011.

PAPENDICK, R. I.; CAMPBELL, G. S. **Theory and measurement of water potential**. In. Water Potential Relations in Soil Micorbiology, pp.1-22, Soil Science Society of America, Madison, 1980, 667p.

PEREIRA, R. M.; SANDRI, D.; RIOS, G. F. A.; SOUSA, D. A. O. Automation of irrigation by electronic tensiometry based on the Arduino hardware platform. **Ambiente e Água**, v.15, n.4, p.1-12, 2020.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v.20, n.3585, p.1-14, 2020.

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 solo. **Irriga**, v.22, n.3, p.458-468, 2017.

ROMERO, R.; MURIEL, J. L.; GARCÍA, I.; DE LA PEÑA, D. M. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, v.114, p.59-66, 2012.

SOARES, F. C.; ROBAINA, A, D.; PEITER, M. X.; RUSSI, J. L.; VIVAN, G. A. Redes neurais artificiais na estimativa da retenção de água no solo. **Ciência Rural**, v.44, n.2, p.293-300.

SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**, 1ed, Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2011, 771p.

SIDRA Sistema IBGE de recuperação automática. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca15/brasil>. Acesso em: 27 de dezembro de 2020.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M. D. Measurement of soil water content with 50-MHz soil dielectric sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.394-403, 2004.

SEZEN, S. M.; YAZAR, A.; DASGAN, Y. et al. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. **Agricultural Water Management**, v.143, p.59-70, 2014.

SILVA, G. H.; FERREIRA, M. G.; PEREIRA, S. B.; DELAZARI, F. T.; SILVA, D. J. H. Response of bell pepper crop subjected to irrigation depths calculated by different methodologies. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.1, p.45-50, 2018.

SILVA, M. C. A.; TARGA, M. S.; CEZAR, V. R. S. Arduino system and ultrasonic sensor for automation of the determination of water infiltration rate in soil. **Ambiente & Água**, v.15, n.7, p.1-13, 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**, 3ed, Porto Alegre, Artmed, 2004, 720p.

THALHEIMER, M. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.44, n.3, p.114-119, 2013.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil moisture content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, n.3, p.574-582, 1980.

VALENÇA, D. C.; CARVALHO, D. F.; REINERT, F.; AZEVEDO, R. A.; PINHO, C. A.; MEDICI, L. O. Automatically controlled deficit irrigation on lettuce in “organic potponics”. **Scientia Agricola**, v.75, n.1, p.52-59, 2018.

VALERIANO, T. T. B.; SANTANA, M. J.; OLIVEIRA, A. F.; MACHADO, L. J. M. Alfaca americana cultivada em ambiente protegido submetida a doses de potássio e lâminas de irrigação. **Irriga**, v.21, n.3, p.620-630, 2016.

van GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-897, 1980.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; KVIEN, C.; BEDNARZ, C. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.61, p.44-50, 2008.

WITERHALTER, L.; MISTELE, B.; JAMPATONG, S.; SCHMIDHALTER, U. High throughput phenotyping of canopy water mass and canopy temperature in well-watered and drought stressed tropical maize hybrids in the vegetative stage. **European Journal of Agronomy**, v.35, p.22-32, 2011.

ZHU, L.Z.; LI, X. Study of automatic control system for irrigation. **Advanced Materials Research** v.219–220, p.1463–1467, 2011.

CAPÍTULO I

AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR TENSÍOMETRIA ELETRÔNICA EM DOIS TIPOS DE SOLO BASEADA NA PLATAFORMA DE HARDWARE ARDUINO

PEREIRA, R. M.; SANDRI, D.; RIOS, G. F. A.; SOUSA, D. A. O. Automation of irrigation by electronic tensiometry based on the Arduino hardware platform. **Ambiente e Água**, v.15, n.4, p.1-12, 2020.

5 AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR TENSIOMETRIA ELETRÔNICA EM DOIS TIPOS DE SOLO BASEADA NA PLATAFORMA DE HARDWARE ARDUINO

5.1 RESUMO

Neste estudo, foi desenvolvido e avaliado um sistema eletrônico de controle da irrigação acionado a partir do potencial matricial de água do solo. O controlador utiliza o tensiômetro e transdutor de pressão como mecanismo de leitura, integrado a uma placa micro controladora Arduino que atua no acionamento de válvulas solenoides e um conjunto motobomba monofásico de 1/3 CV. Quatro tensiômetros eletrônicos foram instalados em embalagens plásticas contendo 6 kg de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) de textura argilosa e quatro com 7 kg de Neossolo Regolítico (NR) de textura arenosa. Os acionamentos dos componentes de automação da irrigação ocorreram de forma autônoma nos valores de potenciais críticos de - 20, - 25, - 30 e - 35 kPa para o LVA e - 10, - 15, - 20 e - 25 kPa para o NR, com tolerância de 20% de variação, e desativados após a aplicação da lâmina necessária para elevar o potencial a -10 kPa no LVA e -5 kPa no NR. A performance da automação de irrigação foi considerada satisfatória por manter os potenciais críticos dentro dos limites pré-estabelecidos nos dois tipos de solo. O controle de automação foi funcional para potenciais matriciais entre - 10 kPa e - 35 kPa no LVA e entre - 5 kPa e - 25 kPa no NR.

Palavras-chave: manejo de irrigação, potencial matricial, inovação tecnológica

5.2 ABSTRACT

This study developed and evaluated an electronic irrigation system controlled by soil water matric potential. The controller uses tensiometers and pressure transducers as a reading mechanism, integrated with an Arduino microcontroller board that drives the solenoid valves and a 1/3 hp single-phase motor. Four electronic tensiometers were installed in plastic containers filled with 6 kg of Red-Yellow Latosol (RYL) with a clayey texture, and another four in plastic containers filled with 7 kg of Regolitic Neosol (NR) with a sandy texture. Irrigation automation components were activated autonomously at the critical potentials of - 25, -30, and -35 kPa for RYL, and -10, -15, -20, and -25 kPa for RN, with a 20% variation tolerance. The entire system is able to monitor and control irrigation based on soil water matric potential. Components were deactivated when the soil water potential reached the field

capacity of each soil type. Irrigation automation performance was considered satisfactory, as it kept critical potentials within the pre-established thresholds in both soil types. Automation control was set for matric potentials between -10 kPa and -35 kPa in RYL, and between -5 kPa and -25 kPa in RN.

Keywords: irrigation management, matric potential, technological innovation.

5.3 INTRODUÇÃO

A irrigação baseada na disponibilidade hídrica do solo é uma solução prática para o uso racional da água na agricultura irrigada. A tensão de água no solo, também denominada potencial matricial, permite de forma indireta estimar a umidade do solo e assim, estimar a disponibilidade hídrica às culturas agrícolas (Dobriyal, et al., 2012). A utilização de um dispositivo que permita monitorar o potencial matricial e convertê-lo em sinal elétrico possibilita o desenvolvimento de um sistema de automação de irrigação que se relacione de forma direta ao consumo hídrico das plantas (Bianchi et al., 2017). O planejamento da irrigação em função do monitoramento da umidade do solo é uma técnica capaz de proporcionar aumento da produtividade e eficiência do uso da água em diversas culturas (Romero et al., 2012).

Os tensiômetros são equipamentos que fornecem medidas diretas do potencial matricial devido à conexão hidráulica entre a água do solo e a água no interior do tubo do tensiômetro. A medida em que se reduz a umidade do solo, a água do tensiômetro é transferida para o solo através de uma cápsula porosa, criando assim, uma pressão negativa no interior do tensiômetro, a qual pode ser detectada por dispositivos mecânicos, vacuômetros ou dispositivos digitais como o transdutor de pressão (Thalheimer, 2013; Freire et al., 2018). A utilização de tensiômetros que sejam capazes de monitorar o potencial matricial à distância traz alguns benefícios operacionais, como por exemplo, a redução das medidas in-loco, que a partir do manuseio do tensiômetro, podem afetar o contato da cápsula com o solo, além disso, a sua adoção resulta em uma redução significativa no tempo necessário para a obtenção da umidade do solo em um sistema de cultivo (Arruda, et al., 2017).

O alto custo de data loggers, multiplexadores e sensores, a falta de informações técnicas, dificuldades na instalação e manutenção dos equipamentos e a ausência de sistemas de comunicação e armazenamento dos dados de campo por meio eletrônico, ainda são fatores

limitantes para a utilização de um número de sensores que possibilitem maior frequência e cobertura da medição do potencial matricial e da umidade do solo. Outro fator crítico que contribui para a baixa adoção do monitoramento da umidade do solo na agricultura é a necessidade de calibração *in loco* dos sensores utilizados. A depender das propriedades físicas do solo e do tipo de sensor, as respostas em relação à variação do potencial e umidade do solo podem ser distintas. Payero et al. (2017) observaram que o sensor de cápsula porosa utilizado no monitoramento do potencial matricial em solos de textura arenosa e argilo-arenosa, possui interferência devido ao decaimento da umidade do solo, que varia em função da sua textura, o que exigiu sua calibração. Recentemente, avanços no campo dos componentes de hardware de “código aberto”, como a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, abriram novas possibilidades para o desenvolvimento de soluções em medição que podem ser interligadas a sistemas de transmissão e armazenamento de dados. Essas inovações possibilitam uma maior cobertura espaço-temporal da umidade do solo a um custo significativamente menor que os dispositivos industriais convencionais (Bitella et al., 2014).

O microcontrolador Arduino executa um programa de código aberto que é criado e atualizado pelo usuário e é capaz de operar vários componentes eletrônicos em um circuito elétrico. O usuário pode modificar a programação e alterar a sua função sem a necessidade de alterações físicas no circuito. Atualmente, existe uma grande variedade de sensores e componentes auxiliares como chips de memória e dispositivos de comunicação, que são disponibilizados em uma interface de fácil compreensão e que podem ser utilizados por pessoas com qualquer nível de conhecimento em eletrônica. Exemplos de circuitos desenvolvidos em Arduino para aplicações em agricultura e monitoramento de variáveis ambientais podem ser encontrados em Masseroni et al. (2016), Karami et al. (2018) e Targa et al. (2019).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou o desenvolvimento e a avaliação de tensiômetros eletrônicos e um sistema de automação para uso na irrigação em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR), utilizando componentes eletrônicos de baixo custo e registro das informações de potencial matricial em plataforma de hardware de código aberto Arduino.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Caracterização físico-hídrica do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR).

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a primeira consistiu no desenvolvimento do sistema e calibração de sensores no Laboratório de Análise de Água na Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, FAV/UnB e a segunda, na avaliação do sistema de automação em ambiente protegido na Estação Experimental de Biologia da UnB. O ambiente protegido consiste em uma casa de vegetação (30 x 13 m) com sistema de arrefecimento evaporativo do ar, composto por um painel de argila expandida, associado a um conjunto motobomba responsável pelo recalque de água à parte superior do painel. Adicionalmente, atuam na remoção do ar úmido de seu interior, oito exaustores com capacidade individual de remoção de 450 m³ ar min⁻¹, instalados na lateral oposta ao painel de argila expandida. O controle de acionamento do sistema de arrefecimento é baseado na temperatura do ar interno, ajustado por um termostato em 27 °C, instalado na parte central da casa de vegetação e a 2 m de altura em relação ao solo.

Utilizaram-se amostras deformadas de LVA coletadas na camada de 0 a 0,2 m em área cultivada com milho (15°56'56,32" S; 47°55'46,16" O) e amostras de NR da camada de 0 a 0,2 m coletadas em área de Cerrado natural (15°58'48,27" S; 47°56'57,54" O). Ambas as amostras foram peneiradas em malha # 2,0 mm e secas ao ar livre para obtenção da TFSA. Após a secagem, coletaram-se cinco amostras simples de cada tipo de solo, que foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos e enviadas para o laboratório para determinação de suas propriedades físicas (Tabela 5-1).

Tabela 5-1. Propriedades físicas e granulométricas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR).

Variáveis	Tipo de solo	
	LVA	NR
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	0,962	1,292
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,636	0,512
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,144	0,200
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,492	0,312
Areia (%)	4,1	77,2
Silte (%)	36,7	8,5
Argila (%)	59,2	14,3

Utilizou-se quatro embalagens de plástico com capacidade total de 10 L, preenchidos com 6 kg de LVA e quatro com 7 kg de NR, ambos preenchendo um volume útil de 0,073 m³. Após aplicações de uma lâmina de irrigação suficiente para a drenagem da água e acomodação do solo das embalagens, foram retiradas amostras indeformadas para elaboração da curva característica de retenção de água no solo pelo método da câmara de pressão de Richards. As equações de retenção de água do LVA e NR foram ajustadas a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980), utilizando a restrição de Mualem e o software RETC (van Genuchten *et al.*, 1991), bem como a umidade dos solos na capacidade de campo (Θ_{cc}) nas tensões de - 10 kPa para o LVA e - 5 kPa para o NR e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) na tensão de - 1500 kPa para ambos os solos (Tabela 5-2).

Tabela 5-2. Equações ajustadas das curvas de retenção de água no solo conforme Van Genuchten, umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) para o LVA e NR.

Tipo de solo	Equação ajustada	R ²	Θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)
LVA	$\theta = 0,159 + 0,514/[1+(0,178h)^{1,23}]^{0,18}$	0,99**	0,41	0,24
NR	$\theta = 0,113 + 0,445/[1+(0,069h)^{1,89}]^{0,47}$	0,98**	0,16	0,11

Θ : umidade volumétrica (cm³ cm⁻³); h: Potencial matricial (kPa); Θ_{cc} : Umidade na capacidade de campo em base volume (cm³ cm⁻³); Θ_{pmp} : umidade do solo no ponto de murcha permanente em base volume (cm³ cm⁻³); **Significativo a 0,05.

5.4.2 Monitoramento do potencial matricial em LVA e NR e armazenamento das informações

A estrutura da automação foi subdividida em dois sistemas principais, um consistiu em monitoramento e armazenamento de dados de potencial matricial e outro na automação de irrigação por gotejamento. Para monitoramento do potencial matricial do solo e armazenamento das leituras, elaborou-se um sistema baseado em uma placa microcontroladora Arduino MEGA 2560, conectada a módulos eletrônicos externos e transdutores de pressão.

A placa Arduino é equipada com microcontroladores Atmel AVR e possui comunicação serial com interface analógica e digital para conexão com *hardwares* externos. O microcontrolador é programado com um software de código aberto que pode ser obtido gratuitamente no *website* do projeto Arduino (<http://www.arduino.cc>). Este software é escrito em Java e além de fornecer o ambiente para o desenvolvimento dos códigos de programação, é utilizado para compilação e *up-load* dos programas para o micro controlador. Todos os

códigos são escritos em uma linguagem similar a C/C++ com algumas simplificações e modificações. A programação para automação de irrigação em função de potenciais matriciais críticos, desenvolvido para a pesquisa está apresentada no Apêndice (Capítulo 8).

O tipo de sensor utilizado no tensiômetro eletrônico foi o transdutor de pressão diferencial piezoresistivo MPX5700DP (Freescale Semiconductor®), com compensação de temperatura e circuito de amplificação integrados, o qual fornece uma saída de voltagem linear a uma pressão diferencial na faixa de 0 a 700 kPa. O transdutor de pressão tem como elemento sensível piezoresistores de silício monolítico, que geram voltagem de saída que varia conforme a pressão aplicada. A sensibilidade do sensor corresponde a 6,4 mV/kPa, de acordo com a especificação técnica do fabricante, requer uma fonte de alimentação de 5 V, fornece uma voltagem máxima de saída de 4,7 V e offset de 0,2 V para diferenças de pressões respectivas de 700 e 0 kPa. Esse tipo de sensor foi utilizado em diversas aplicações científicas ao longo dos anos (Greswell, et al., 2009; Thalheimer, 2013; Masseroni et al., 2016) e recentemente em tensiômetros como mecanismo de leitura do potencial matricial de água no solo (Thalheimer, 2013; Arruda et al., 2017).

Para verificar a sensibilidade do transdutor MPX5700DP às pressões diferenciais em relação à pressão atmosférica no interior do tensiômetro devido à sucção mátrica, um procedimento de calibração foi conduzido em laboratório.

Em um suporte de madeira de dimensões de 110 x 12,5 cm, foi fixado o módulo para a calibração do transdutor de pressão, sendo este composto de um tubo de PVC branco de 0,60 m de comprimento e diâmetro de ½”, com a extremidade inferior vedada (Figura 5-1) e na extremidade superior conectado a um transdutor de pressão.

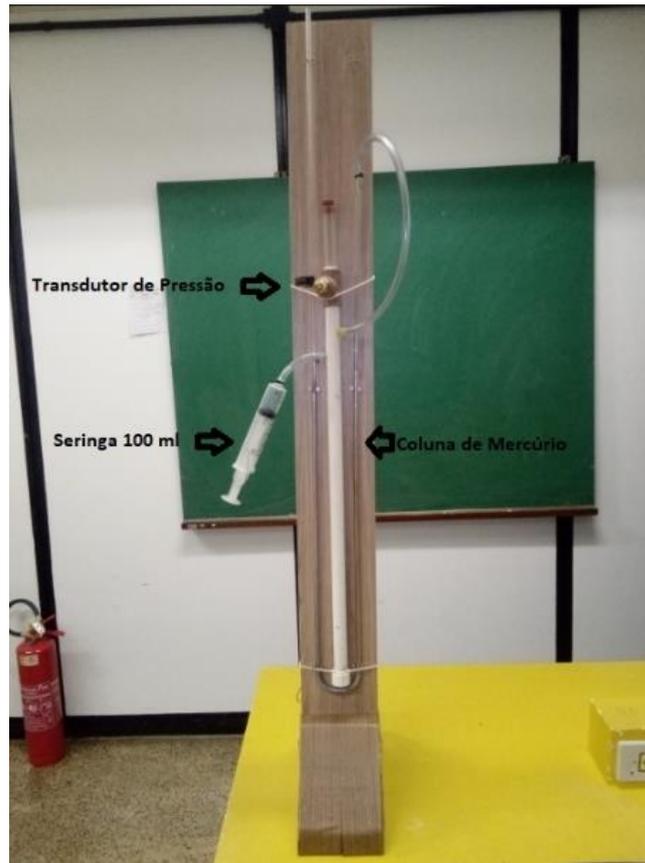


Figura 5-1. Módulo para calibração de transdutores de pressão.

Acima do transdutor de pressão e no prolongamento do tubo de PVC fixou-se um tubo de acrílico de 12 mm de diâmetro interno, vedado com rolha de silicone, própria para uso em tensiômetros. Uma seringa de 100 mL foi conectada no tubo de PVC a 0,10 m abaixo do transdutor de pressão e, no lado oposto a este, foi conectada uma mangueira de cristal, que por sua vez foi conectada ao manômetro de mercúrio em U, sendo este de acrílico com 5 mm de diâmetro interno.

A utilização do módulo de calibração dos transdutores de pressão segue os seguintes procedimentos: i) O transdutor de pressão é conectado à placa Arduino seguindo a pinagem do documento técnico do fabricante (*datasheet*); ii) O tubo de PVC é preenchido com água até a altura de inserção da seringa de 100 mL; iii) O código para obtenção dos dados de calibração é carregado à placa Arduino por meio de sua interface USB; v) Sucessivas sucções são realizadas manualmente a partir da seringa e são registrados os valores lidos pelo transdutor de pressão bem como a altura de desalinhamento das colunas de mercúrio; iv) De posse dos dados de altura de deslocamento da coluna de mercúrio e da pressão de sucção lida pelo transdutor, gera-se o modelo de calibração.

A diferença em relação à pressão atmosférica observada na coluna de mercúrio foi calculada pela Equação 1.

$$\Delta P = Hg\rho \quad (1)$$

em que, ΔP = Pressão lida pelo manômetro de Hg (kPa); H = altura de ascensão da coluna de mercúrio (m); g = aceleração gravitacional ($9,81 \text{ m s}^{-2}$); ρ = densidade do mercúrio ($13,6 \text{ g cm}^{-3}$).

O método de regressão dos quadrados mínimos foi utilizado para desenvolver a relação funcional entre os valores de pressão de sucção obtidos pelo manômetro com mercúrio e o transdutor de pressão. O teste F da análise de variância da regressão foi utilizado para testar a hipótese de validação dos coeficientes do modelo ajustado.

5.4.3 Construção do tensiômetro eletrônico

O tensiômetro eletrônico consiste em uma modificação de um modelo convencional de tensiômetro em PVC (policloreto de vinil) branco de $\frac{1}{2}$ ", com adaptação para conexão do transdutor de pressão em sua extremidade superior (Figura 5-1A). Para avaliar o efeito de ruídos nas leituras do transdutor de pressão, originadas a partir de oscilações de corrente elétrica no seu sinal de saída, comuns a este tipo de sensor (Reodique e Schultz, 2005), utilizou-se um filtro de média móvel de ordem 10. Nesse filtro, um conjunto de leituras do sinal de saída do transdutor é convertido em uma amostra de tamanho M pré-estabelecida (M = 10). O primeiro valor da média móvel é obtido pela média da primeira amostra, o segundo valor da média a partir da exclusão do primeiro número da série incluindo-se a próxima leitura sob uma amostra de mesmo tamanho M e assim sucessivamente, conforme Equação 2.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (2)$$

em que, $y[i]$ = média móvel; M = ordem ou tamanho da amostra; x = sinal de saída.

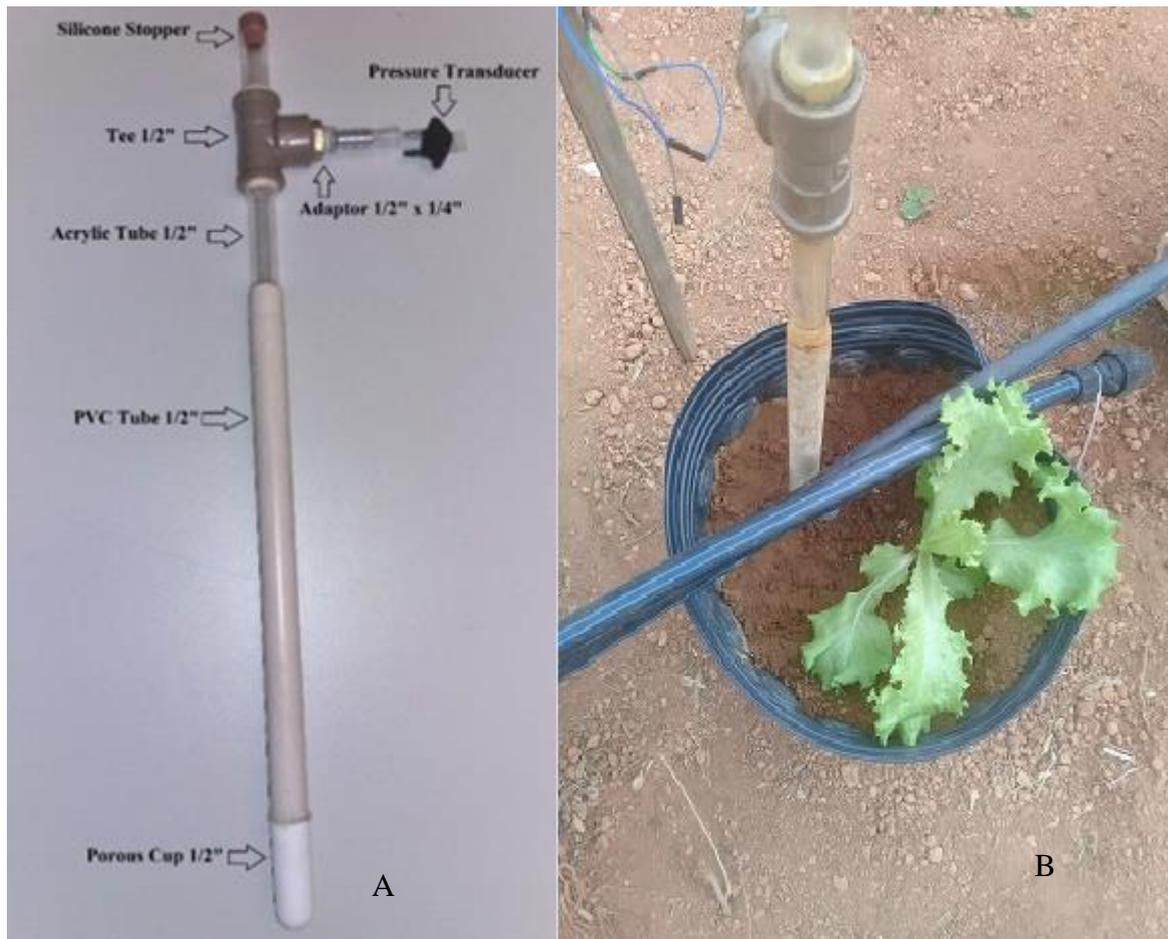


Figura 5-2. Protótipo de tensiômetro eletrônico (A) e tensiômetro eletrônico instalado em embalagem com solo (B).

As leituras dos tensiômetros eletrônicos foram obtidas a cada 120 s com gravação dos dados em um arquivo no formato *.txt* em um módulo SD-Card. Cada gravação foi associada as respectivas datas e horários a partir da integração de um módulo RTC (*Real Time Clock*).

5.4.4 Circuito eletrônico e componentes de automação

O hardware do sistema de controle de automação de irrigação foi composto de uma integração entre o tensiômetro eletrônico, placa Arduino, módulo RTC, módulo SD-Card, módulos relés, válvulas solenoides de 1/2" e motobomba monofásica de 1/3 CV (Figura 5-2). Para alimentação de energia elétrica da placa Arduino foi utilizada uma fonte de 7,5 V e para os transdutores de pressão e módulos relés, uma de 5 V. Todas as fontes foram conectadas em um filtro de linha ligado à rede convencional de energia, a qual opera na tensão de 220 V (Figura 5-2).

Cada módulo relé possui 4 canais, assim, utilizou-se dois módulos relés para o acionamento de oito válvulas solenoides e um relé de 1 canal para acionar uma motobomba monofásica de 1/3 CV, para a conexão dos transdutores de pressão, foram utilizadas oito portas analógicas da placa Arduino. O número de válvulas é limitado pela quantidade de canais no módulo relé e o número de transdutores que podem ser utilizados simultaneamente depende da quantidade de portas analógicas da placa Arduino utilizada, no caso específico do Arduino MEGA, pode chegar a 16 conexões analógicas simultâneas.

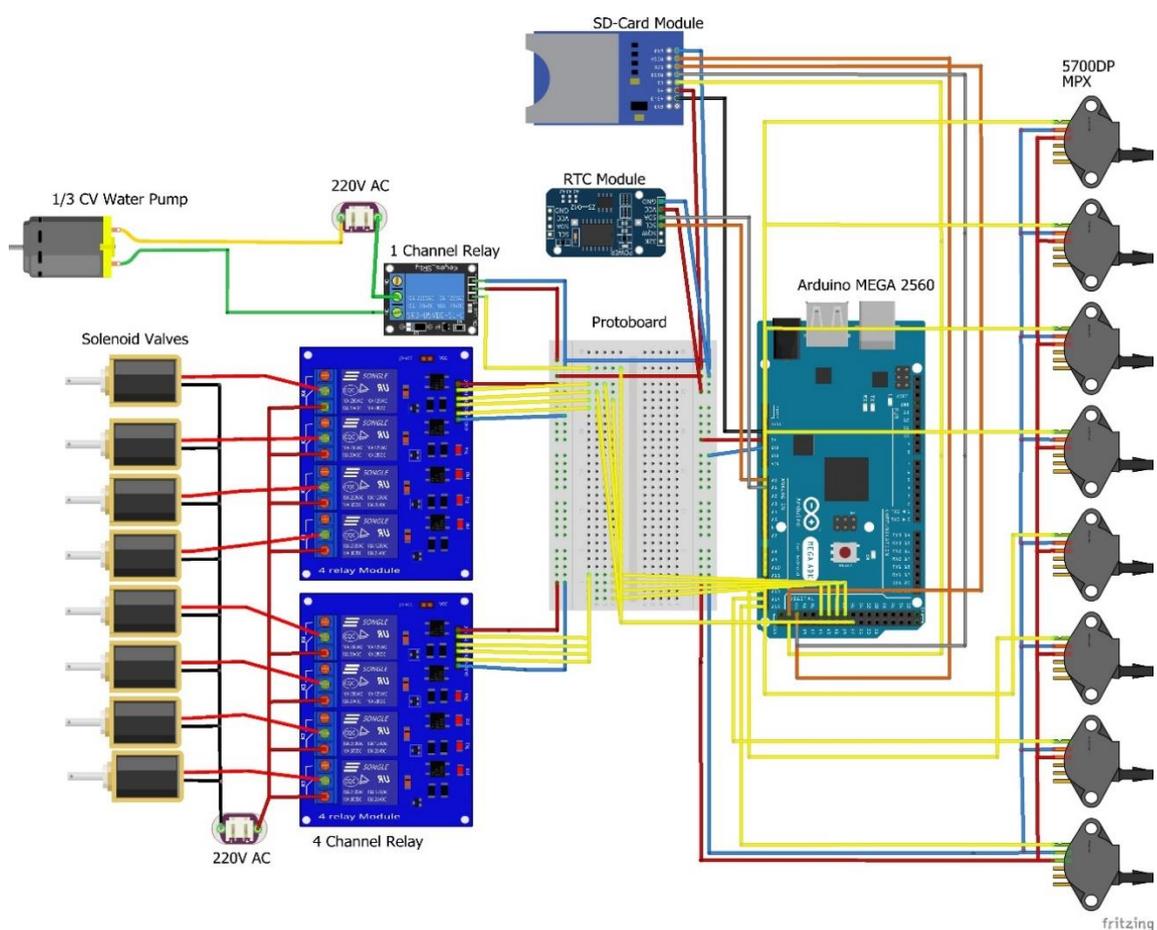


Figura 5-3. Ligação elétrica dos componentes do sistema da automação de irrigação por tensiometria eletrônica.

5.4.4 Componentes e funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento.

Utilizou-se no sistema de gotejamento de fluxo turbulento com emissores do tipo *on-line*, instalados em tubos de 16 mm de diâmetro externo, vazão de 4,0 L h⁻¹ na pressão de serviço de 10 m.c.a., controlada por regulador de pressão, instalando-se um emissor por embalagem, posicionados a 10 cm dos tensiômetros. Utilizou-se um filtro de disco de 125

mícron, tomadas de pressão instaladas após as válvulas solenoides, manômetro de Bourdon com glicerina com precisão de $0,1 \text{ kgf cm}^{-2}$, registros de esfera, conexões hidráulicas e um reservatório com capacidade de 1000 L de água. A Figura 5-4 mostra em detalhes os componentes eletrônicos utilizados e sua integração com o sistema de irrigação.



Figura 5-4. Sistema de bombeamento (A) com filtro de discos de 130 micra (1) Motobomba monofásica, 1/3 CV, afogada (2), manômetro com glicerina para medir pressão na saída da bomba (3) e reservatório de 1000 L (4). Componentes do sistema de automação da irrigação (B) com placa Arduino (5), módulos relés (6), módulo data logger (7), módulo RTC (8), fonte reguladora de tensão (9), regulador de pressão (10). Visão geral do sistema de irrigação e cultivo (C).

Para a programação da automação de irrigação foi desenvolvido um código contendo um *loop* principal e sub-rotinas para execução dos seguintes procedimentos: i) medição do potencial matricial fornecido em cada leitura, sua respectiva data e horário de aquisição; ii) armazenamento das leituras em arquivo *.txt* em intervalo de tempo pré definidos; iii) comparação dos valores lidos de potencial matricial com valores críticos definidos pelo usuário para que o sistema atuasse no acionamento da motobomba e abertura e fechamento de

válvulas solenoides. De maneira geral, a programação consiste na aplicação da função de transferência calibrada do transdutor, a qual converte os valores da conversão analógico/digital em unidades de pressão (kPa). O código também permite alterações na resolução temporal de aquisição das leituras, bem como nos valores de potenciais críticos e no tempo necessário para irrigação.

Foram pré-estabelecidos potenciais críticos para o controle do acionamento da irrigação, sendo de - 20, - 25, - 30 e - 35 kPa para o LVA, denominados como LVA/E1, LVA/E2, LVA/E3 e LVA/E4, respectivamente e de - 10, - 15, - 20 e - 25 kPa para o NR, denominados NR/E1, NR/E2, NR/E3 e NR/E4, respectivamente. Para o término de um determinado turno de irrigação especificou-se o tempo necessário para restabelecimento da umidade na capacidade de campo (Equação 3), em irrigação localizada com manejo por tensiometria, adaptado de Braga e Calgaro, (2010).

$$T_i = \frac{L_b \cdot A_m}{n \cdot Q} \quad (3)$$

em que, T_i = Tempo de irrigação (min); L_b = Lâmina bruta de aplicação (mm); A_m = Área umedecida pelo gotejador ($0,0051 \text{ m}^2$); n = Número de gotejadores por embalagem (1); Vazão do gotejador (4 L h^{-1}).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O coeficiente de determinação (R^2) da calibração do transdutor de pressão foi de 0,99 e os testes dos parâmetros da equação de regressão apresentaram níveis de significância $p < 0,001$ (Figura 5-3a), entretanto, em comparação à reta 1:1, nota-se que as leituras do transdutor de pressão superestimaram todas as leituras obtidas pelo manômetro de Hg, o que também ocorre em outros dispositivos, como observado por Freire et al. (2018), que ao utilizarem o vacuômetro de Bourdon e o tensímetro digital em comparação ao manômetro de Hg, como mecanismo de leitura em tensiômetro, verificaram que ambos os dispositivos superestimam as leituras em Hg, e que a diferença entre eles e o manômetro de Hg aumenta à medida em que a umidade do solo diminui. O mesmo foi observado por Beraldo et al. (2012), ao compararem o manômetro de Hg com tensímetro digital de punção em um tensiômetro instalado na profundidade de 0,2 m em Latossolo e observaram, ainda, valores de R^2 entre 0,88 e 0,99, próximos ao obtido neste estudo (0,99).

Em uma condição de potencial matricial de - 12 kPa para o LVA e - 13 kPa para o NR, foi realizada uma sequência de medições do potencial matricial, sem a aplicação da média móvel, durante aproximadamente 140 s com resolução de 10 s (Figura 5-3B – Trecho 1), onde observa-se que as leituras oscilaram entre e entre - 8,2 e - 14,1 kPa no LVA e entre - 8,8 e - 17,7 kPa no NR, resultando em amplitudes de - 5,9 e - 8,9 e kPa, respectivamente. As oscilações observadas neste intervalo são provenientes de variações da corrente elétrica no sinal de saída do transdutor. A ocorrência destas variações em amplitudes desta magnitude pode levar a acionamentos indevidos do sistema de irrigação, uma vez que a diferença entre os potenciais críticos de acionamento é de - 5 kPa, tanto para o LVA, quanto para o NR.

Após a aplicação da média móvel a partir de 145 s (Figura 5-3b – Trecho 2), verifica-se uma efetiva redução dos ruídos, estabelecendo assim, uma variação dentro de uma amplitude de - 1,1 kPa para o LVA e de - 1,4 kPa para o NR. Dessa forma, os valores de potencial matricial representam de maneira mais fidedigna o potencial matricial do solo, além disso, o risco de acionamentos incorretos da automação de irrigação é eliminado. Em relação à eficiência da adoção da média móvel na suavização de leituras de sensores, Zhuang et al. (2007) destacam que uma boa aplicação dessa técnica está relacionada à taxa de amostragem das leituras obtidas pelo sensor, a qual deve ser suficiente para a formação de um número maior de amostras, entretanto, isso pode ser um fator limitante em sensores que possuem um alto consumo elétrico. Por sua vez, os sensores utilizados na plataforma Arduino tem a vantagem de demandarem baixo consumo de energia e podem ser alimentados por baterias e sistemas fotovoltaicos de baixa tensão (Bitella et al., 2014).

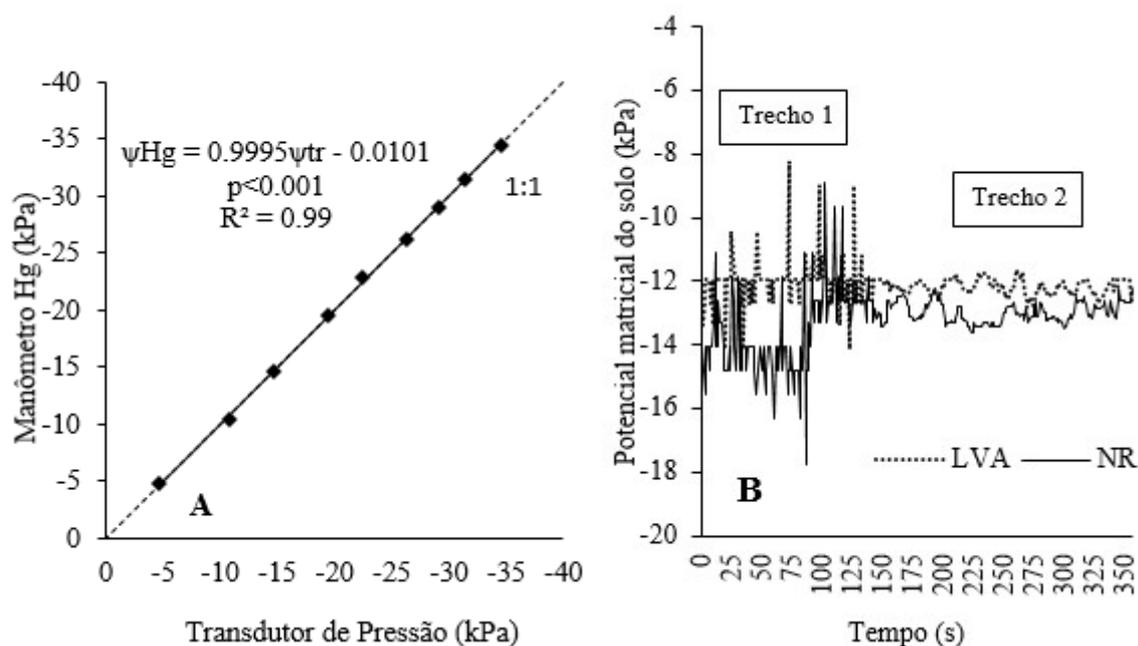


Figura 5-5. Curva experimental de calibração do transdutor MPX5700DP (A). Leitura dos tensiômetros eletrônicos sem aplicação de média móvel (Trecho 1) (B) e com aplicação de média móvel (Trecho 2) (B).

A variação observada do potencial matricial no solo no interior das embalagens para os controles LVA/E1 e NR/E1 demonstra a redução dos potenciais em função da evaporação e drenagem da água do solo e o seu aumento após as irrigações realizadas (Figura 5-4). As linhas horizontais destacam os valores críticos de acionamento e o valor do potencial na capacidade de campo em cada tipo de solo. Houve ocorrência de flutuações nas leituras dos tensiômetros até o momento do acionamento da irrigação e a média-móvel foi eficiente na redução destas, entretanto, efeitos ambientais e do solo podem causar pequenas variações nas leituras do tensiômetro eletrônico ao longo do tempo. As flutuações podem ser resultado de alterações diurnas na temperatura ambiente que podem exercer um efeito de contração ou expansão do volume de ar no interior do tensiômetro, e conseqüentemente, alterar o sinal emitido pelo mecanismo sensível do transdutor de pressão (Thalheimer, 2013). Outra questão que pode estar associada a este comportamento é a dinâmica de redistribuição de água no solo, que, associada ao processo de evaporação e drenagem, ocorre de maneira distinta entre cada tipo de solo e entre cada embalagem, e que pode refletir no potencial matricial próximo à cápsula porosa do tensiômetro (Almeida et al., 2017).

Durante o período de 14 dias de avaliação da automação de irrigação, os valores lidos pelos tensiômetros eletrônicos apresentaram respostas distintas em cada tipo de solo, o que resultou em diferentes turnos de rega para o LVA e o NR. O número de irrigações em cada

controle (Tabela 5-3), demonstra que à medida que se reduz o potencial crítico de acionamento, o turno de rega aumenta e a frequência de irrigações diminui, resultando assim, na aplicação de uma menor lâmina de irrigação. Para os controles realizados no LVA, o LVA/E2 apresentou o maior desvio em relação ao potencial de acionamento (- 1,2 kPa), já para o NR, o maior desvio foi observado no controle NR/E2 (- 0,6 kPa). Os desvios apresentados, apesar de se mostrarem em geral, abaixo de 1 kPa, são resultado da interrupção das leituras pela programação da automação. Durante o monitoramento do potencial, a irrigação é acionada no tensiômetro da embalagem que primeiro atingir o seu valor crítico, nesse instante, o monitoramento de todos os tensiômetros é interrompido e se inicia novamente após a finalização da irrigação. Essa interrupção pode em algum momento, fazer com que o potencial crítico no próximo tensiômetro de controle, exceda levemente o seu limiar de acionamento. Os tempos mínimos e máximos necessários para as irrigações no LVA foram de 3,1 e 5,3 min para os potenciais matriciais dos tensiômetros de - 20 e - 35 kPa, respectivamente. Já para o NR, o tempo mínimo e máximo de irrigação foi de 2 min e 3,2 min, para os potenciais matriciais de - 10 e - 25 kPa, respectivamente.

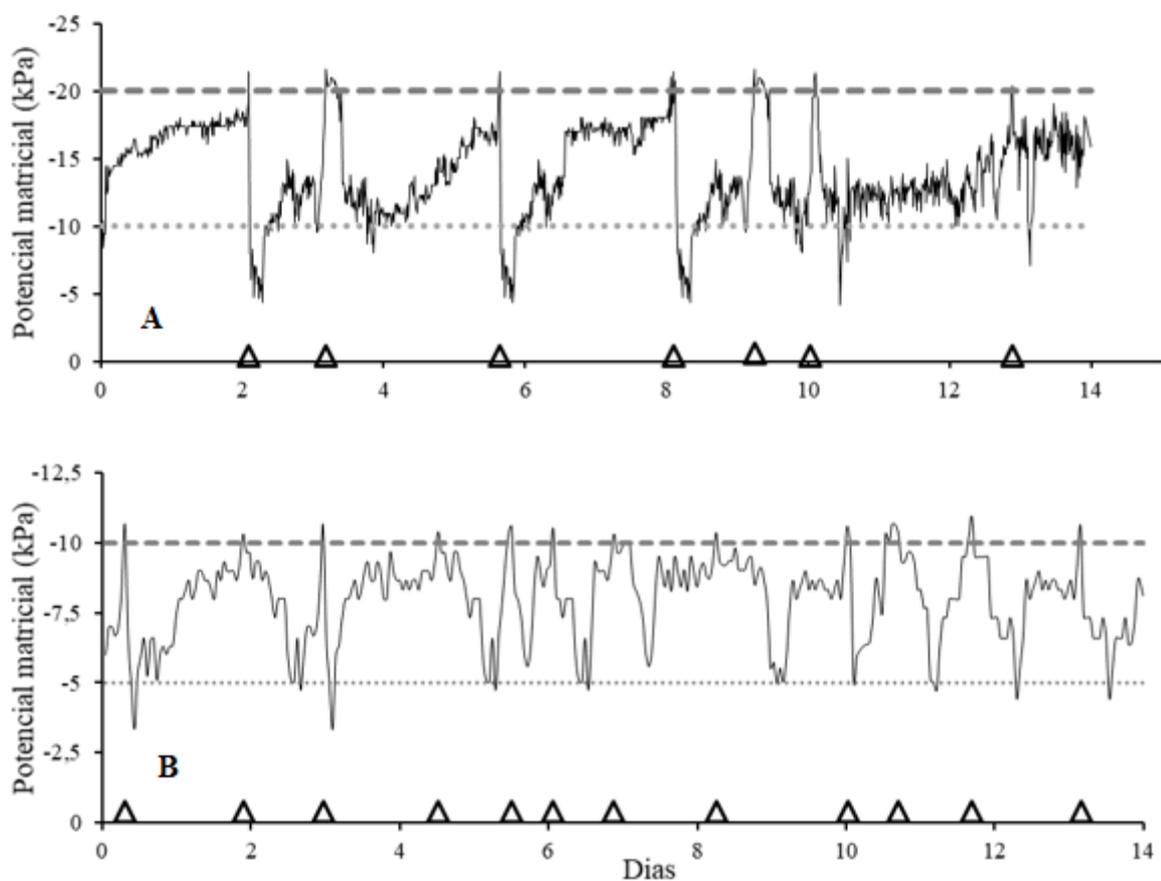


Figura 5-6. Variação média do potencial matricial dos tensiômetros eletrônicos em função do tempo, em dias, para o LVA/E1 (A) e NR/E1 (B) e eventos de acionamento da irrigação (Δ). As linhas horizontais representam os potenciais críticos de acionamento (tracejado superior) e capacidade de campo (tracejado inferior) para os controles LVA/E1 (- 20 kPa/- 10 kPa) e NR/E1 (-10 kPa/- 5 kPa).

Em relação à manutenção dos potenciais matriciais dentro dos limites críticos estabelecidos, observa-se que os potenciais matriciais do LVA apresentaram variações entre 1,5 e 4,7 % nas leituras no acionamento da irrigação e entre 9,9 e 23,1 % nos potenciais lidos ao final da irrigação (Tabela 5-3). Já para o NR, no acionamento variou entre 0,6 e 3,9 % e no final da irrigação variou entre 12,4 e 15,4 %. A programação da automação foi realizada para que ao final de cada evento de irrigação o potencial estivesse próximo a capacidade de campo em cada tipo de solo, sendo de - 10 kPa para o LVA e - 5 kPa para o NR. Entretanto, foi observado que ao final de alguns eventos, este potencial se situava em valores acima do valor utilizado na programação. Este comportamento é esperado, pois após o final de cada irrigação, a frente de molhamento continua se movimentando para baixo aumentando a umidade do solo e o potencial matricial, até que se estabeleça uma condição de equilíbrio na região da cápsula porosa (Freire et al., 2018).

A partir destes resultados, o controle da irrigação via potencial matricial pode ser considerado satisfatório, uma vez que, os coeficientes de variação dos valores de potenciais, tanto no momento de acionamento, quanto ao final da irrigação, estiveram próximos a 20% em todos os controles, tanto para o LVA, quanto para o NR. Este comportamento do sistema de automação foi observado considerando um período de avaliação de 14 dias, onde ocorreu um total de 19 acionamentos para o LVA e de 31 acionamentos para o NR. Segundo Almeida et al. (2017), um controlador de irrigação é considerado adequado, quando os valores críticos são mantidos dentro de uma tolerância de até 20% em relação ao limiar adotado, e que esta variação deve ocorrer em pelo menos 90% do tempo de operação do sistema.

Tabela 5-3. Valores de potenciais de acionamento da irrigação (PotA), potenciais ao término da irrigação (PotP), desvio padrão (DesvP), coeficiente de variação (CV), número de acionamentos da irrigação (NAI), lâmina aplicada (LA) para quatro embalagens (E) com LVA e NR.

Tipo de solo/E	PotA (kPa)	CV do PotA (%)	DesvP do PotA (kPa)	PotP (kPa)	CV do PotP (%)	DesvP do PotP (kPa)	NAI	LA (mm)
LVA/E1	- 20,5	2,8	- 0,5	- 7,5	13,3	- 1,0	7	25,5
LVA/E2	- 25,4	4,7	- 1,2	- 10,2	21,8	- 2,2	5	23,5
LVA/E3	- 30,6	1,5	- 0,4	- 11,7	23,1	- 2,7	4	22,1
LVA/E4	- 35,3	1,8	- 0,6	- 10,7	9,9	- 1,0	3	18,6
NR/E1	- 10,5	2,2	- 0,2	- 4,7	15,4	- 0,7	12	31,0
NR/E2	- 15,7	3,9	- 0,6	- 5,0	12,4	- 0,6	10	27,5
NR/E3	- 20,5	2,7	- 0,5	- 4,4	14,4	- 0,6	5	17,6
NR/E4	- 25,3	0,6	- 0,1	- 4,9	12,6	- 0,6	4	15,1

Os tensiômetros são dispositivos que apesar de não serem capazes de atuar em toda a faixa de água disponível no solo, são extremamente eficientes no monitoramento da umidade na faixa úmida. Teoricamente, os tensiômetros podem atuar até 100 kPa sem que haja o rompimento da sua coluna hidráulica interna, este valor em solos de textura arenosa, representa cerca de 70% da água disponível, porém em solos argilosos, somente 40% da água disponível pode ser monitorada (Braga e Calgareo, 2010). Ainda assim, de maneira geral, maiores valores de potenciais críticos (próximos à capacidade de campo: - 10 a - 30 kPa), são utilizados em culturas agrícolas mais sensíveis ao estresse hídrico, enquanto que menores potenciais (- 40 a - 60 kPa), são adotados em culturas mais tolerantes (Bianchi et al., 2017). Considerando a água disponível como o intervalo de umidade do solo entre o ponto de murcha permanente (- 1500 kPa) e a capacidade de campo (- 10 kPa para o LVA e - 5 kPa para o NR), o sistema de automação em LVA atuou no monitoramento de 21, 27, 32 e 36% da água disponível nos controles de - 20, - 25, - 30 e - 35 kPa, respectivamente e no NR

monitorou 46, 62, 76 e 77 % da água disponível nos controles de - 10, - 15, - 20 e - 25 kPa, respectivamente.

Considerando o ambiente protegido utilizado na pesquisa, que possui dimensões de 30 x 13 m, o custo da automação da irrigação de oito setores, tendo como base o sistema desenvolvido é de R\$ 5.432,94, podendo variar em função da quantidade de tensiômetros, válvulas solenóides e outros componentes empregados em cada projeto de manejo, bem como modelos e marca de fabricação. Já para aquisição de um sistema convencional para automação como o mesmo número de setores e sistema de cultivo, o custo é de R\$ 7.788,12, sendo 30,7% inferior na automação com Arduino (Tabela 5-4) É importante destacar que não foram incluídos o custo da estrutura física do ambiente protegido, bem como do sistema de arrefecimento interno.

Tabela 5-4. Custo total médio para automação da irrigação de uma estufa de 30 x 13 m utilizando os componentes propostos no sistema de programação com Arduino e com equipamentos convencionais.

Componente	Quantidade	Custo Automação Arduino (R\$)	Custo Automação Convencional (R\$)
Microcontrolador Arduino	1	62,61	
Transdutor de pressão	8	725,36	
Tensiômetro construído de ½” sem manômetro	8	360,00	
Módulo SdCard	1	8,90	
Módulo relé 4 canais	2	50,00	
Válvula solenóide ½”	8	328,80	
Módulo RTC	1	19,45	
Fonte reguladora de tensão 12 V	1	50,00	
Placa protoboard, solda, resistores, fios elétricos.	1	30,00	
Termostato	1	61,42	61,42
Controlador convencional 8 setores	1		748,20
Válvula solenoides de 1”	8		1.191,20
Tensiômetro convencional com manômetro acoplado adquirido no mercado	8		2.111,52
Motobomba monofásica 1/3 CV	1	980,00	980,00
Reservatório de 1000 L	1	290,00	290,00
Filtro de discos de 1”	1	70,00	70,00
Regulador de pressão de 15 PSI	2	98,00	98,00
Tubo PELBD 16 mm	2	640,00	640,00
Gotejadores on line	360	280,00	280,00
Vasos de cultivo de 10 L	360	1.339,20	1.339,20
Conexões hidráulicas	--	40,00	40,00
Custo Total		5.432,94	7.849,54

No sistema convencional de automação considerou-se tensiômetros convencionais para o monitoramento do potencial matricial, sendo necessária a observação do operador para indicar o momento de potencial matricial crítico ou não que indique o momento de irrigar. No entanto, o desligamento do sistema de irrigação ocorre de forma programada no controlador de irrigação. Por sua vez, o uso da programação com Arduino o acionamento e desligamento são automatizados, uma vez que o tensiômetro é conectado a placa micro controladora Arduino, substituindo o controlador de irrigação convencional. O sistema em Arduino ainda conta com o módulo de armazenamento de dados, o qual permite o monitoramento constante da variação do potencial matricial, o que deve ser realizado de maneira manual no sistema convencional com monitoramento em momentos pré-definidos.

No contexto do trabalho desenvolvido, alguns aspectos são importantes serem destacados, visando obter melhor resposta do sistema de automação, dentre eles:

A instalação dos tensiômetros deve ser realizada de modo a garantir o melhor contato possível entre a cápsula porosa e o solo, isso é possível quando ela ocorre em uma condição de umidade que facilite a introdução do tensiômetro na profundidade desejada. Para adequada precisão e funcionamento do sistema proposto, a uniformidade de aplicação de água do sistema de irrigação por gotejamento deve ser excelente, bem como o local de instalação das cápsulas dos tensiômetros é determinante, já que a umidade é medida pontualmente, o que depende, portanto, grandemente da formação do bulbo molhado, já que apenas uma amostra de tensiômetro representa a demanda de água das demais embalagens de cultivo.

Geralmente os tensiômetros necessitam ser reabastecidos com água para a continuidade das leituras, nesse momento, deve se tomar cuidado para que o manuseio do equipamento não afete o contato da cápsula porosa com o solo e não o danifique. Quando o nível da água no interior do tensiômetro encontrar-se próximo ao nível do solo, recomenda-se o seu reabastecimento até o nível do adaptador de inserção do transdutor de pressão, principalmente no NR, onde, em condição de baixa umidade, qualquer manuseio indevido do equipamento pode prejudicar o contato da cápsula com o solo e conseqüentemente, as leituras de potencial matricial.

Em relação ao processo de construção dos tensiômetros, deve-se ter muita atenção no procedimento de confecção dos dispositivos, com cuidado especial à vedação das conexões da cápsula porosa e do transdutor de pressão com ao tubo de PVC, ainda, a integralidade dos componentes eletrônicos deve ser avaliada, para que não ocorram curtos-circuitos que podem danificar o sistema de automação. Ressalta-se que os componentes eletrônicos utilizados na

plataforma Arduino, são muito sensíveis, especialmente em relação à umidade e a elevadas temperaturas, e que, se não forem devidamente instalados e protegidos de intempéries podem ter seu tempo de vida útil reduzido.

Durante a operação do tensiômetro eletrônico em campo, a verificação do seu funcionamento pode ser realizada a partir do monitoramento das tensões de entrada (*Vcc*) e saída (*Signal*) do transdutor de pressão, a qual pode ser realizada com o auxílio de um multímetro ajustado para a tensão máxima de 20 V.

A identificação dos pinos *Vcc*, *Ground* e *Signal* do transdutor é facilmente obtida no documento técnico do fabricante (*Datasheet*). O módulo RTC exige muita atenção durante a operação do sistema, o qual necessita de uma bateria de lítio CR2032 de 3 V para o seu funcionamento, onde, regularmente deve ser verificada a necessidade de sua troca, para que não ocorram erros nos registros de data e hora no arquivo de armazenamento de dados, do monitoramento de potencial matricial.

Para um funcionamento adequado do sistema automação / monitoramento / armazenamento é necessário se utilizar de alimentação elétrica individual para placa micro controladora, bem como para os módulos e sensores utilizados, isso porque o uso de fontes externas individualizadas se mostrou eficaz para a manutenção da amperagem necessária para o funcionamento simultâneo de todos os componentes do sistema.

O sistema de automação é de simples construção e sua programação pode ser facilmente ajustada de acordo com a necessidade do usuário. Estas características são importantes na sua aplicação por pequenos produtores, pois a um custo reduzido, é possível a adoção de um sistema de automação de irrigação que atue de acordo com a dinâmica da água no solo, levando assim, a um uso racional da água na irrigação, o qual pode ser replicado em casas de vegetação com temperatura controlada. A flexibilidade de utilização dos componentes eletrônicos de código aberto permite alterar facilmente a quantidade de tensiômetros, válvulas e relés o que possibilita a aquisição do sistema a um custo que esteja de acordo com a necessidade do usuário.

As conclusões obtidas neste trabalho não devem ser generalizadas, ou seja, é recomendável replicar a automação e o monitoramento utilizados em diferentes condições de solo, cultura, ambiente (protegido ou campo), adicionalmente, há a possibilidade de adaptar a transmissão de dados via *web* e outros protocolos de comunicação, bem como o próprio controle da automação, e, ao mesmo tempo, tornar a automação mais autônoma a partir do acionamento dos componentes elétricos com energia de origem fotovoltaica.

5.6 CONCLUSÕES

O transdutor de pressão foi eficiente como mecanismo de leitura em tensiômetros eletrônicos no monitoramento do potencial matricial na faixa úmida do solo entre - 20 e - 35 kPa em LVA e entre - 10 e - 25 kPa em NR.

O sistema de automação atuou com precisão no controle da irrigação em LVA e NR em ambiente protegido respondendo de forma efetiva à programação executada pela placa microcontroladora Arduino.

A utilização da média móvel como técnica de suavização do sinal de saída do transdutor de pressão é eficiente na correção de leituras irregulares que podem interferir no funcionamento da automação de irrigação.

O custo do sistema de automação com Arduino foi 30,7% inferior em relação a um sistema convencional.

5.7 REFERÊNCIAS

ARRUDA, L. E. V.; FIGUEIRÊDO, V. B.; LEVIEN, S. L. A.; MEDEIROS, J. F. Desenvolvimento de um tensiômetro digital com sistema de aquisição e armazenamento de dados. **Irriga**, ed. Especial, IRRIGA & INOVAGRI, v.1, n.1, p.11-20, 2017.

ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; RAINE, S. R.; CAMARGO, A. P.; PINTO, M. F.; SALVADOR, C. A. Irrigation controller mechanically actuated by soil water tension: II – Field evaluations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.5, p.298-303, 2017.

BERALDO, J. M. G.; CORA, J. E.; FERNANDES, E. J. Measurement systems of soil water matric potential and evaluation of soil moisture under different irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.3, p.467-478, 2012.

BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v.14, n.10, p.19639-19659, 2014.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. Uso da tensiometria no manejo da irrigação. **Circular técnica**, Embrapa Semiárido, 2010, 28p.

BIANCHI, A.; MASSERONI, D.; THALHEIMER, M.; MEDICI, L. O. FACCHI, A. Field irrigation management through soil water potential measurements: a review. **Italian Journal of Agrometeorology**, v.2, n.2, p.25-38, 2017.

DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**, v.458-459, p.110-117, 2012.

FREIRE, A. G.; ALENCAR, T. L.; CHAVES, A. F.; NASCIMENTO, I, V.; ASSIS JÚNIOR, R. N. A.; van LIER, Q. de J.; MOTA, J. C. A. Comparison of devices for measuring soil matric potential and effects on soil hydraulic functions and related parameters. **Agricultural Water Management**, v.209, p.134-141, 2018.

GRESWELL R.; ELLIS P.; CUTHBERT M.; WHITE R.; DURAND V. The design and application of an inexpensive pressure monitoring system for shallow water level measurement, tensiometry and piezometry. **Journal of Hydrology**, v.373, n.3-4, p.416- 425, 2009.

KARAMI, M.; McMORROW, G. V. WANG, L. Continuous monitoring of indoor environmental quality using an Arduino-based data acquisition system. **Journal of Building Engineering**, v.19, p.412-419, 2018.

MASSERONI, D.; FACCHI, A.; DEPOLI, E. V.; RENGA, F. M.; GANDOLFI, C. Irrig-oh: An open-hardware device for soil water potential monitoring and irrigation management. **Irrigation and Drainage**, v.65, n.5, p.750-761, 2016.

PAYERO, J. O.; QIAO, X.; KHALILIAN, A.; NAFCHI, A. M.; DAVIS, R. Evaluating the effect of soil texture on the response of three types of sensors used to monitor soil water status. **Journal of Water Resource and Protection**, v.9, n.6, p.566-577, 2017.

REODIQUE A.; SCHULTZ W. **Freescale Semiconductor Application Note**. Noise considerations for integrated pressure sensors. abr. 2005. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1646.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2020

ROMERO, R.; MURIEL, J. L.; GARCÍA, I.; PEÑA, D. M. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, v.114, p.59-66, 2012.

TARGA, M. S.; SILVA, M. C.; CEZAR, V. R. S. Uso de microcontrolador Arduino para a determinação da permeabilidade do solo. **Revista Técnica de Ciências Ambientais**, v.1, n.1, p.1-14, 2019.

THALHEIMER, M. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 44, n.3, p. 114-119, 2013.

van GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-897, 1980.

van GENUCHTEN, M. T; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**, Washington, Environmental Protection Agency, 1991. 100 p.

ZHUANG Y.; CHEN, L.; WANG, X. S. A weighted moving average-based approach for cleaning sensor data. **27th International Conference on Distributed Computing Systems** p.1-8, 2007.

CAPÍTULO II

TENSIÔMETROS ELETRÔNICOS INTEGRADOS A PLACA ARDUINO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA ALFACE EM DIFERENTES POTENCIAIS MATRICIAIS CRÍTICOS E TIPOS DE SOLO

6 TENSIOMETROS ELETRÔNICOS INTEGRADOS A PLACA A ARDUINO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DA ALFACE EM DIFERENTES POTENCIAIS MATRICIAIS CRÍTICOS E TIPOS DE SOLO

6.1 RESUMO

Objetivou-se avaliar respostas da alface, cv. Wanda, submetida à diferentes potenciais matriciais críticos de irrigação controlados por tensiômetros eletrônicos. Os tensiômetros foram integrados a uma placa microcontroladora Arduino para controle da automação de irrigação. Adotou-se delineamento experimental em blocos completos casualizados com quatro repetições, tendo como potenciais matriciais críticos -15, -20, -25 e -30 kPa em Latossolo Vermelho Amarelo e -10, -15, -20 e -25 kPa em Neossolo Regolítico. Aos 33 dias após o transplante, foram obtidos parâmetros fenométricos da alface, índice Falker de clorofila e a eficiência do uso da água (EUA). O sistema de automação monitorou e registrou os potenciais ao longo do ciclo da alface, acionou e interrompeu a irrigação de acordo com os potenciais críticos adotados. Os potenciais matriciais apresentaram variações médias em relação aos valores críticos para acionamento e interrupção da irrigação entre 1,45% e 5,50% no Latossolo Vermelho Amarelo e entre 2,90% e 15,50% no Neossolo Regolítico, respectivamente. A adoção de potenciais críticos acima de -15 kPa em Neossolo reduz significativamente a frequência de irrigação. O maior peso de matéria fresca foi obtido no potencial matricial de -10 kPa em Neossolo Regolítico e a maior EUA em -15 kPa no Latossolo Vermelho Amarelo.

Palavras-chave: Déficit hídrico, automação, agricultura de precisão

6.2 ABSTRACT

This study aimed to evaluate lettuce, cv Wanda responses to soil water potentials for irrigation controlled by electronic tensiometers. The tensiometers were integrated with an Arduino microcontroller to control an irrigation automation system. A randomized complete block design with four replications was adopted, with critical potentials of -15, -20, -25, and -30 kPa in Red Yellow Latosol and -10, -15, -20, and -25 kPa in Regolitic Neossol. At 33 days after transplanting, lettuce phenometric parameters, chlorophyll Falker index, and water use efficiency (EUA) were obtained. The automation system monitored and recorded the

potentials throughout the lettuce cycle and triggered and stopped the irrigation according to the critical potentials adopted. The soil water potentials showed average variations to the critical values for starting and stopping irrigation between 1.45% and 5.50% in the Oxisol and between 2.90% and 15.50% in the Regolitic Neossol respectively. The adoption of critical potentials above -15 kPa in Neossolo significantly reduces the frequency of irrigation. The highest fresh matter weight was obtained at the matrix potential of -10 kPa in Regolitic Neossol and the highest EUA was obtained in -15 kPa in the Red Yellow Latosol.

Keywords: Water deficit, automation, precision agriculture

6.3 INTRODUÇÃO

O uso racional da água no cultivo de hortaliças nos próximos anos irá depender da eficiência de sistemas de irrigação controlados por sensores que sejam capazes de evitar os prejuízos causados pela irrigação excessiva ou pelo déficit hídrico, os quais causam, em sistemas ineficientes, desperdício de água e limitação ao crescimento vegetal, respectivamente (Medici et al., 2010; Valença et al., 2018). A alface é um vegetal de ciclo curto, de rápido crescimento e possui alta demanda de água e nutrientes, entretanto é capaz de fornecer elevados incrementos de massa fresca durante o seu ciclo (Geisenhoff et al., 2016). Estudos que envolvem secagem lenta do solo com posterior umedecimento completo em embalagens fornecem um método de imposição de déficit hídrico que mimetiza a maioria das situações no campo e é recomendado para o estudo da influência do stress hídrico no desenvolvimento de raízes, absorção de nutrientes, interação raiz-parte aérea e fenotipagem para tolerância à seca (Turner, 2018).

A abordagem que utiliza o acompanhamento do status hídrico do solo torna a decisão de irrigar mais eficiente, pois se relaciona à disponibilidade hídrica das plantas e pode ser sustentada em medições realizadas em tempo real (Montesano et al., 2016). Existem diversos controladores de irrigação no mercado que regulam o conteúdo de água no solo a partir de medições realizadas por sensores. Estes controladores permitem acionar a irrigação quando os sensores detectam valores abaixo de um valor pré-definido como limite inferior de umidade do solo e irrigam até a detecção de um valor definido como limite superior de umidade. Geralmente, a referência de umidade do solo destes controladores é estabelecida tendo como referência o potencial matricial na capacidade de campo (Romero et al., 2012).

Recentemente, avanços no campo dos componentes de *hardware* de código aberto, como a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, introduziram novas ferramentas de medição da umidade do solo que podem ser interligadas a sistemas de armazenamento, transmissão de dados e automação (Bitella et al., 2014). O microcontrolador Arduino executa um programa de código aberto que é capaz de operacionalizar componentes eletrônicos em um circuito elétrico. Atualmente, existe uma grande variedade de sensores e componentes auxiliares como módulos de armazenamento de dados e de comunicação que podem ser aplicados a sistemas de automação e monitoramento de variáveis ambientais aplicados à agricultura (Masseroni et al., 2016; Targa et al., 2019).

O controle da automação de irrigação tendo como referência o monitoramento do potencial matricial do solo com eletrônica de baixo custo pode ser uma alternativa viável para a inserção da tecnologia à produção comercial de hortaliças (Valença et al., 2018). Tensiômetros eletrônicos acoplados na plataforma Arduino utilizam como mecanismo de leitura transdutores de pressão, que integrados a um circuito de controle, possibilitam a automação da irrigação a partir da leitura direta do potencial matricial do solo (Pereira et al., 2020).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar as respostas da cultura da alface cultivada em embalagens submetidas a diferentes potenciais matriciais críticos de reposição hídrica em um sistema de automação de irrigação controlado pelo microcontrolador Arduino integrado a tensiômetros eletrônicos.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

6.4.1 Local do experimento

O estudo foi conduzido em casa de vegetação na Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília (UnB), situada nas coordenadas 15°44'08,7" S e 47°52'58,2" O. O clima da região, segundo Köppen-Geiger, é do tipo Aw, caracterizado como tropical, com estação seca no inverno, precipitação média anual é de 1360 mm, temperatura máxima média anual de 26,7 °C e mínima média anual de 16,1 °C (Cardoso et al., 2014).

A casa de vegetação possui dimensões de 30 m de comprimento e 13 m de largura, com sistema de arrefecimento evaporativo do ar, composto por um painel de argila expandida o qual atua como meio poroso para distribuição lateral da água, associado a um conjunto

motobomba responsável pelo recalque à parte superior do painel e 8 exaustores com capacidade de remoção de $450 \text{ m}^3 \text{ ar min}^{-1}$.

O controle de acionamento do sistema de arrefecimento foi baseado na temperatura do ar interno, ajustado por um termostato em $27 \text{ }^\circ\text{C}$, instalado na parte central da casa de vegetação a 2 m de altura em relação ao solo. Na altura do pé direito foi instalado um sombrite com 50% de luminosidade. A Figura 6-1. apresenta o interior do ambiente protegido com a indicação dos componentes de arrefecimento evaporativo do ar.



Figura 6-1. Vista interna da casa de vegetação e componentes de arrefecimento evaporativo do ar.

6.4.2 Caracterização físico-hídrica e química do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR) e preparo das embalagens de cultivo

Para o cultivo das plantas de alface (*Lactuca sativa* L.), cv. Wanda, foram utilizadas embalagens de 10 L, preenchidos com amostras deformadas de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) de textura argilosa coletadas na camada de 0 a 0,20 m em área de cultivos anuais ($15^\circ 56' 56,32'' \text{ S}$; $47^\circ 55' 46,16'' \text{ O}$) e amostras de Neossolo Regolítico (NR) de textura arenosa da camada de 0 a 0,20 m coletadas em área de Cerrado natural ($15^\circ 58' 48,27'' \text{ S}$; $47^\circ 56' 57,54'' \text{ O}$). Ambas as amostras foram peneiradas em # 2,0 mm e secas ao ar livre. Após a secagem, coletaram-se cinco amostras simples de cada tipo de solo para determinação de suas propriedades física (Tabela 6-1) e qualidade química (Tabela 6-2).

Tabela 6-1. Características físicas e granulométricas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Noeossolo Regolítico (NR).

Características	LVA	NR
Densidade aparente do solo (g cm ⁻³)	0,962	1,292
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,636	0,512
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,144	0,200
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,492	0,312
Areia	4,1%	77,2%
Silte	36,7%	8,5%
Argila	59,2%	14,3%

Tabela 6-2. Qualidade química do solo na camada de 0-0,20 m do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Noeossolo Regolítico (NR).

Características	LVA	NR	Características	LVA	NR
pH em CaCl ₂	5,6	4,2	H + Al (cmolc dm ⁻³)	3,7	5,5
P (mg dm ⁻³)	7,8	4,1	SB (cmolc dm ⁻³)	4,7	1,0
K (mg dm ⁻³)	62	45	t (cmolc dm ⁻³)	4,7	1,7
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	3,5	0,6	T (cmolc dm ⁻³)	8,4	6,6
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,0	0,2	V (%)	56,4	15,9
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,01	0,68	m (%)	0,2	39,3

t = CTC efetiva, T = CTC a pH = 7,0, m = saturação por alumínio, V = saturação por bases, SB = soma de bases trocáveis.

Foram utilizadas 64 embalagens com volume útil de 0,073 m³ preenchidas com 6 kg de LVA e 64 embalagens com 7 kg de NR. Na base interna de cada embalagem foi colocada uma manta sintética não tecida e sobre esta foi adicionada uma camada de 0,02 m de brita # 2,0 cm para auxiliar a drenagem. As mudas de alface foram produzidas em bandejas de poliestireno expandido de 200 células, preenchidas com substrato comercial composto de fibra de coco e vermiculita. O transplântio de uma muda por embalagem foi realizado no momento em que as mesmas apresentaram, em média, 5 folhas definitivas.

6.4.3 Delineamento experimental e adubação

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 4x2, sendo quatro potenciais críticos e dois tipos de solo. Cada parcela experimental foi composta de quatro embalagens de cultivo com espaçamento entre linhas de 1,0 m e espaçamento entre plantas de 0,4 m. Também foram implantadas 52 embalagens de bordadura na área, resultando em um total de 180 embalagens de cultivo. As embalagens foram posicionadas

sobre tijolos de 9 furos (Figura 6-2) para evitar contato direto com o solo do interior da casa de vegetação, minimizando os efeitos de transmissão de doenças, uma vez que o ambiente possui histórico de incidência de várias doenças fúngicas.

A adubação nos vasos foi realizada manualmente a lanço, convertendo a quantidade recomendada, em kg ha^{-1} , para g embalagem^{-1} (Tabela 6-3), considerando a área da seção de cada embalagem (530 cm^2), a análise de fertilidade (Tabela 6-2) e as dosagens de acordo com a recomendação proposta por Ribeiro et al. (1999).

Tabela 6-3. Adubação realizada nas embalagens preenchidas com LVA e NR.

Nutriente	Recomendação		Total por		Plantio	1 ^a aplicação	2 ^a aplicação	3 ^a aplicação
	(kg ha ⁻¹)		embalagem (g)					
	LVA	NR	LVA	NR				
N	150	150	21,2	21,2	20%	20%	30%	30%
P ₂ O ₅	300	400	92,9	123,8	100%	-	-	-
K ₂ O	90	120	9,6	13,0	20%	20%	30%	30%

6.4.4 Caracterização físico-hídricas dos solos

Antes do transplântio das mudas para as embalagens foi efetuada a aplicação de 25 mm de água distribuída em 3 aplicações, suficiente para a drenagem da água pelo fundo das embalagens e acomodação do solo em seu interior, em seguida foram retiradas amostras indeformadas para elaboração da curva característica de retenção de água no solo pelo método da câmara de pressão de Richards. As equações de retenção de água do LVA e NR foram ajustadas a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980), utilizando a restrição de Mualem e o software RETC (van Genuchten et al., 1991), bem como a umidade dos solos na capacidade de campo (Θ_{cc}) nos potenciais de - 10 kPa para o LVA e - 5 kPa para o NR e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) no potencial de - 1500 kPa para ambos os solos (Tabela 6-4).

Tabela 6-4. Equações ajustadas das curvas de retenção de água no solo conforme Van Genuchten, umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) para o LVA e NR.

Tipo de solo	Equação ajustada	R ²	Θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)
LVA	$\theta = 0,159 + 0,674/[1+(0,178h)^{1,23}]^{0,18}$	0,99**	0,55	0,23
NR	$\theta = 0,113 + 0,445/[1+(0,069h)^{1,89}]^{0,47}$	0,98**	0,40	0,11

Θ : umidade volumétrica (cm³ cm⁻³); h: Potencial matricial (kPa); Θ_{cc} : Umidade na capacidade de campo em base volume (cm³ cm⁻³); Θ_{pmp} : umidade do solo no ponto de murcha permanente em base volume (cm³ cm⁻³); **Significativo a $p < 0,05$.

6.4.5 Sistema de irrigação

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento com emissores do tipo *on-line*, instalados em tubos de PEBD de 16 mm de diâmetro externo, vazão de 4,0 L h⁻¹ na pressão de serviço de 10 m.c.a. mantida por um regulador de pressão, com um emissor por embalagem de cultivo. Utilizou-se um filtro de discos de 125 micra, tomadas de pressão instaladas após as válvulas solenóides, manômetro de Bourdon com glicerina com precisão de 0,1 kgf cm⁻², registros de esfera, conexões hidráulicas e um reservatório com capacidade de 1000 L. No início do experimento foi medida a vazão de 16 gotejadores com 3 repetições, por tempo de coleta de 2 minutos, determinando-se o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), o qual foi de 97,06%.

6.4.6 Sistema de automação e monitoramento de variáveis micrometeorológicas e potenciais matriciais do solo

O monitoramento do potencial matricial do solo foi realizado por tensiômetros eletrônicos acoplados a transdutores de pressão modelo MPX5700DP, os quais convertem o vácuo parcial do interior do tensiômetro em sinal elétrico e o transmitem para a placa microcontroladora Arduino. A placa Arduino MEGA 2560 integrava os tensiômetros com outros módulos do sistema, ou seja, módulo RTC (*Real Time Clock*), módulo SD-Card (*Data Logger*), módulos relés, válvulas solenóides de ½” e motobomba monofásica de 1/3 CV.

Cada módulo relé possui 4 canais, assim, utilizou-se dois módulos relés para o acionamento de oito válvulas solenóides e um relé de 1 canal para acionar a motobomba e para a conexão dos transdutores de pressão, foram utilizadas oito portas analógicas da placa Arduino. Para a alimentação de energia elétrica da placa Arduino foi utilizada uma fonte DC de 7,5 V e para os transdutores de pressão e módulos relés, utilizou-se uma fonte DC de 5 V. Todas as fontes foram conectadas em um filtro de linha ligado à rede convencional de

energia, a qual opera na tensão de 220 V. A Figura 6-2A apresenta a disposição das embalagens com os tensiômetros e a Figura 6-2B um tensiômetro eletrônico.



Figura 6-2. Disposição geral das embalagens e tensiômetros eletrônicos (A); detalhe do tensiômetro eletrônico instalado no interior da embalagem (B).

Para a programação da automação de irrigação foi desenvolvido um código contendo um *loop* principal e sub-rotinas para execução dos seguintes procedimentos: i) medição do potencial matricial fornecido em cada leitura com sua respectiva data e horário de aquisição; ii) armazenamento das leituras em arquivo *.txt* em intervalo de 60 s; iii) comparação dos valores lidos de potencial matricial com valores críticos definidos pelo usuário para que o sistema atuasse no acionamento da motobomba e abertura e fechamento de válvulas solenoides. Os potenciais matriciais críticos (PMc) foram obtidos a partir das curvas características de retenção de água de cada solo, onde, a partir dos valores na capacidade de campo de -10 kPa para o LVA e -5 kPa para o NR, adotou-se os valores de PMc de - 15, - 20, - 25 e - 30 kPa para o LVA, denominados como LVA/-15 kPa, LVA/-20 kPa, LVA/-25 kPa e LVA/-30 kPa, respectivamente e de - 10, - 15, - 20 e - 25 kPa para o NR, denominados NR/-10 kPa , NR/-15 kPa, NR/-20 kPa e NR/-25 kPa , respectivamente. Para o término de um determinado turno de irrigação, especificou-se o tempo necessário para restabelecimento da

umidade no potencial na capacidade de campo em cada solo utilizando a Equação 1, indicada para a irrigação localizada com uso de tensiometria (adaptado de Braga e Calgato, 2010).

$$T_i = \frac{L_b * A_m}{n * Q} \quad (1)$$

em que, T_i = tempo de irrigação (min); L_b = lâmina bruta de aplicação (mm); A_m = diâmetro molhado pelo gotejador (0,057 m); n = número de gotejadores por embalagem (1); Q = vazão do gotejador (0,066 L min⁻¹). A temperatura e a umidade relativa do ar foram obtidas por meio do sensor conjugado DHT-22, integrado a uma placa Arduino UNO. O sensor possui capacidade de leitura de umidade entre 0 e 100% e temperatura entre -40 e 125 °C e foi instalado na parte central do experimento a 1,0 m de altura do solo, com leituras a cada 60 s e armazenamento dos dados em arquivo de texto pelo módulo SD-Card (*Data Logger*).

6.4.7 Parâmetros fenométricos da alface, eficiência do uso da água e índice Falker de clorofila total

Aos 33 DAT foi determinado o número de folhas (NF), altura do caule (AC), diâmetro do caule (DC), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca de raízes (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR), bem como se estimou o índice Falker de clorofila a (CLA), clorofila b (CLB), clorofila total (CLT) e a eficiência do uso da água (EUA). Para todas as variáveis obtidas foram consideradas quatro plantas úteis por repetição, totalizando 16 plantas por tratamento.

Na contagem de NF consideraram-se apenas as folhas expandidas, com comprimento mínimo de 5 cm, cor verde típica da cultivar, desprezando-se as folhas secas rentes ao solo (Viana et al., 2004) e aquelas cujo limbo foliar estava danificado em mais de 50%, por injúrias diversas. A AC foi definida após a retirada das folhas mensurando-se a distância entre o colo da planta e a inserção da bainha da primeira folha (mais nova), com paquímetro digital, precisão de 0,01 mm. O DC foi medido na região do colo da planta, após a retirada de todas as folhas, com as leituras em mm, realizadas com o auxílio do paquímetro, a MFPA foi obtida a partir da pesagem de folhas e caule e a MFR foi obtida pela pesagem da raiz seccionada a partir do colo de cada planta. Posteriormente, a MSPA e MSR foram obtidas por pesagem após secagem das folhas caules e raiz em estufa de circulação forçada a 65 °C durante 72 h. Ambas as medições de massa fresca e massa seca foram realizadas em balança de precisão com resolução de 0,01 g

A determinação indireta dos valores de clorofila foi realizada utilizando-se um clorofilômetro, marca ClorofiLOG® modelo CFL 1030. A partir dos resultados do índice de clorofila a (CLA), clorofila b (CLB) e total (CLT) foram ajustados modelos de regressão linear para descrever a relação entre os potenciais críticos e o índice de clorofila médio obtido em cada tratamento de reposição hídrica. A eficiência do uso da água (EUA) foi obtida considerando a MFPA e a lâmina total de irrigação (mm) aplicada por tratamento a partir da relação MFPA/lâmina total.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste ‘F’, onde, nos casos de significância, realizou-se o teste Tukey de comparação de médias para as variáveis fenométricas das plantas e análise de regressão para o índice de clorofila, ambos, ao nível de significância $p < 0,05$. Adicionalmente, os dados de fenométricos foram submetidos à análise de componentes principais. Utilizou-se o software RStudio v. 1.3.1073.

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.5.1 Sistema de automação da irrigação e variáveis micrometeorológicas

Os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar durante o ciclo da cultura foram de 27,9 °C e 68%, respectivamente (Figura 6-3). A temperatura máxima tolerável da alface é de cerca de 30 °C para a maioria das cultivares (Diamante et al., 2013). Os dados são semelhantes aos observados por Villas Boas et al. (2008), onde registraram em casa de vegetação, valores médios de 25 °C e 66,5% para temperatura do ar e umidade relativa, respectivamente.

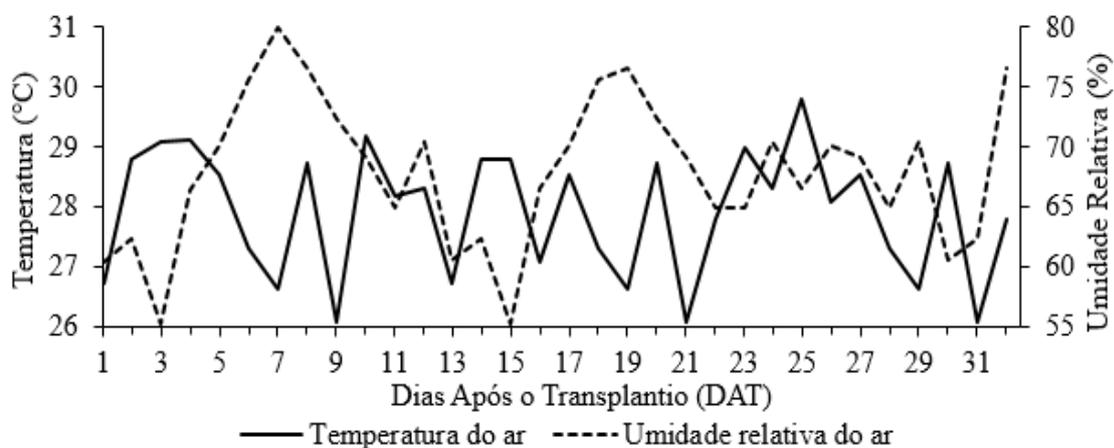


Figura 6-3. Variação média diária da temperatura do ar e umidade relativa do ar durante o ciclo.

Observa-se que cada PMc apresenta uma dinâmica temporal distinta, em que, o LVA/-15 kPa (Figura 6-4A), manteve os valores próximos a -10 kPa com algumas ocorrências de valores médios diários próximos a 5 kPa, o que indica umidade excessiva no solo nesses dias, uma vez que o potencial na capacidade de campo para o LVA é de -10 kPa. O PMc LVA/-20 kPa apresentou variações entre -10 e -20 kPa ao longo do ciclo da alface. Os PMc's LVA/-25 e LVA/-30 kPa mantiveram os valores médios diários abaixo dos valores críticos adotados para o acionamento, entretanto, o LVA/-30 kPa apresentou valores médios acima de -15 kPa durante a maior parte do tempo, indicando assim, manutenção da umidade abaixo da capacidade de campo.

No NR (Figura 6-4B) observa-se que o PMc NR/-10 kPa manteve os valores médios entre -6 e -10 kPa durante o ciclo da alface. O potencial matricial (PM) na capacidade de campo para o NR foi considerado como sendo de -5 kPa, e, ao se observar a variação média dos demais PMc's verifica-se que os valores médios diários não atingiram este valor ao longo do ciclo. A maior frequência de irrigação no PMc de -10/kPa foi determinante para a manutenção do PM médio diário mais próximo à capacidade de campo. O PMc NR/-25 kPa manteve os valores médios diários acima de -10 kPa, que indica a manutenção da umidade do solo em valores abaixo da capacidade de campo ao longo do ciclo da alface.

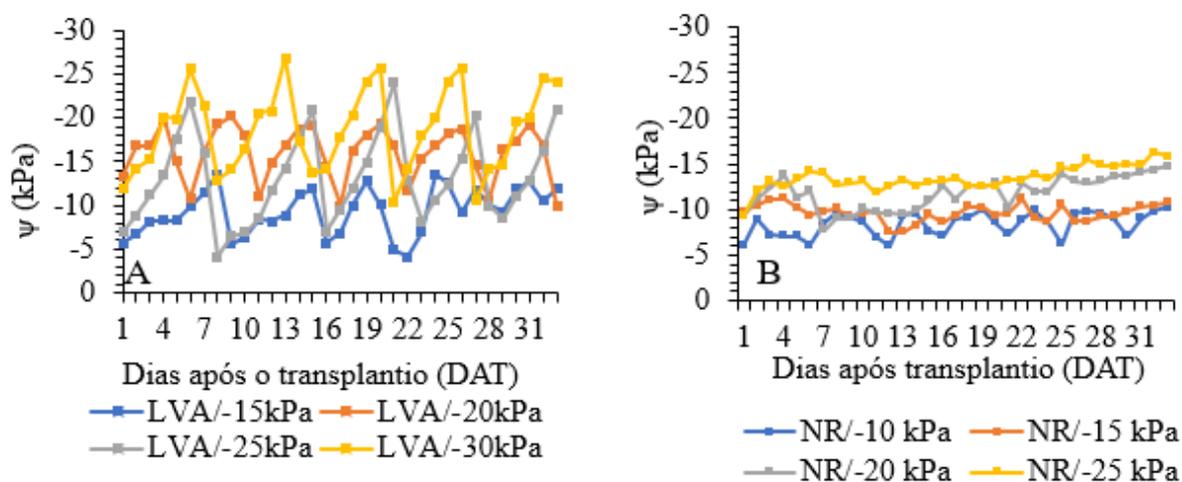


Figura 6-4. Variação média diária do potencial matricial registrado em tensiômetros eletrônicos ao longo do ciclo da alface em LVA (A) e NR (B).

A performance de um controle de irrigação via potencial matricial é considerada satisfatória quando se verifica a manutenção dos potenciais em valores próximos aos limites adotados para acionamento e interrupção da irrigação, considerando uma tolerância máxima

de 20% (Almeida et al., 2017). A partir desse critério, verifica-se que os potenciais em LVA e NR permaneceram dentro dos limites aceitáveis ao longo do ciclo da cultura a alface (Figura 6-4), entretanto, em NR, ocorre uma maior variação na leitura dos potenciais no momento de acionamento e principalmente, após o término da irrigação, sendo esta variação, acima de 20% no NR/-10 kPa (Tabela 6-5).

Solos que drenam a água mais rapidamente são geralmente aqueles que possuem maior macroporosidade, já aqueles que drenam mais lentamente, são solos em que os microporos constituem a maior parte da porosidade total. Assim, como é bem conhecido, um solo arenoso conduz a água mais rapidamente do que um solo argiloso (Hillel, 1998). Sendo assim, a maior variação dos potenciais no NR pode ter sido influenciada por essa característica do solo, o qual possui macroporosidade de 20% e porcentagem de areia de 77% enquanto que o LVA possui 14% de macroporosidade e 4% de areia (Tabela 6-1).

Tabela 6-5. Potenciais matriciais médios de acionamento da irrigação (P_{Ma}), potenciais matriciais médios de interrupção da irrigação (P_{Mi}), desvio padrão (SD) e coeficiente de variação (CV) para os potenciais matriciais críticos (P_{Mc}) no LVA e NR.

Tipo de solo	P _{Mc} (kPa)	P _{Ma} (kPa)	CV (%)	SD (kPa)	P _{Mi} (kPa)	CV (%)	SD (kPa)
LVA	-15	15,52	2,77	0,42	5,81	3,88	0,24
	-20	21,95	0,87	0,16	12,40	2,34	0,30
	-25	25,46	0,89	0,22	10,19	7,52	0,76
	-30	31,08	1,27	0,37	9,34	8,36	0,78
NR	-10	10,51	4,34	0,45	4,52	25,73	1,16
	-15	15,78	3,41	0,53	5,40	11,64	0,62
	-20	20,62	2,02	0,41	4,93	13,58	0,67
	-25	25,66	2,11	0,54	4,88	11,43	0,55

LVA: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e NR: Neossolo Regolítico.

Em parte, a variação nas leituras de PM também pode estar relacionada ao sinal elétrico transmitido pelo transdutor de pressão conectado no tensiômetro. Cada ciclo de secagem e umedecimento do solo altera o volume de ar no interior do tensiômetro, o que pode causar pequenas variações no sinal elétrico de saída transdutor de pressão (Azevedo, 2017). Considerando a CAD como o intervalo de umidade do solo entre o ponto de murcha permanente (-1500 kPa) e a capacidade de campo (-10 kPa para o LVA e -5 kPa para o NR), o sistema de automação em LVA atuou no controle de 13, 21, 27 e 32% da CAD nos P_{Mc}'s LVA/-15, LVA/-20, LVA/-25 e LVA/-30 kPa, respectivamente e no NR controlou 46, 62, 76 e 77% da CAD nos P_{Mc}'s NR/-10, NR/-15, NR/-20 e NR/-25 kPa, respectivamente.

Geralmente, os tensiômetros possuem capacidade de leitura de potencial matricial de até 100 kPa, acima do qual o equipamento perde a escorva e deixa de registrar os potenciais matriciais adequadamente (Bianchi et al., 2017). Até o potencial de 100 kPa, é possível monitorar cerca de 70% da capacidade de água disponível (CAD) em solo de textura arenosa, já em solo de textura argilosa, até 40% da CAD pode ser monitorada (Braga & Calgaro, 2010). Além disso, a boa performance do controlador depende de uma manutenção adequada e de uma correta instalação do tensiômetro para garantir o melhor contato possível entre a cápsula porosa e o solo. As manutenções, que consistem principalmente no reabastecimento do tensiômetro com água se mostraram mais frequentes nos PMc's em NR, principalmente nos potenciais acima de 15 kPa no NR.

6.5.2 Parâmetros fenométricos da alface

Observa-se que os coeficientes de variação (CV) variaram entre 14,34 e 54,24%, sendo as maiores variações para a MFPA e MFR (Tabela 6-6), os quais estão diretamente relacionadas com a produção de fitomassa fresca. Ao aplicar a diferença entre a MFPA e MSPA, verifica-se que o percentual médio de água na alface nos PMc's em LVA foi de 91,2% e em NR foi de 92,1%. Dessa forma, quando a água é extraída a variabilidade é diminuída, como pode ser observado nos CV da MSPA e MSR. A alface possui em média, 94% de água em sua constituição, o que faz com que parte da variabilidade da cultura ocorra devido a variações do teor de água de uma planta para outra, resultando, assim, em um maior CV na MFPA (Guimarães et al., 2019).

O PMc NR/-25 kPa apresentou os menores valores na maioria das variáveis fenométricas avaliadas (Tabela 6-6). A maior redução fenométrica no NR/-25kPa foi observada na MFPA, onde, em relação ao NR/-10kPa a MFPA foi 67% inferior e em relação ao LVA/-30 kPa a redução foi de 29%. A diferença de umidade entre os PMc's NR/-25kPa e NR/-10kPa é de aproximadamente 10% e a frequência de irrigação no NR/-25kPa foi 60% inferior em relação ao NR/-10kPa (Tabela 6-7). Os resultados de MFPA no NR/-10 kPa seguem tendência ao que foi observado por Geisenhoff et al. (2016), onde a maior produtividade da alface crespa em cultivo protegido foi obtida quando a irrigação era realizada em potenciais críticos próximos a -12 kPa.

A redução no NF em função do PMc foi significativa no NR a partir do NR/-15 kPa, enquanto que no LVA, o NF não apresentou diferenças significativas entre os PMc's avaliados. Os maiores valores de DP ocorreram no NR/-10 kPa e não diferenciaram nos

PMc's em LVA. As reduções do DP no NR foram de 6,1, 5,3, e 9,1 cm para os PMc's NR/-15, NR/-20 e NR/-25 kPa, respectivamente (Tabela 6-6). Com base nesses resultados em NR, a redução média do DP foi de 0,04 cm por unidade de incremento do PMc adotado. Resultado inferior ao observado por Geisenhoff et al. (2016), onde, ao utilizarem PMc entre -12 e -70 kPa em solo de textura média, verificaram a redução de 0,08 cm no diâmetro de planta por unidade de incremento no potencial crítico de irrigação adotado.

Os PMc's entre -15 e -30 kPa não alteraram significativamente as repostas fenométricas da cultura da alface para o LVA. Bianchi et al. (2017) relatam alta variabilidade dos PMc's na cultura da alface, os quais dependem de fatores como, espécies e variedades, textura do solo, sistema de irrigação, tipo de dispositivo de monitoramento do potencial matricial e profundidade de instalação do tensiômetro. Em geral, para a cultura da alface, considerando tensiômetros instalados até a profundidade de 0,15 m em solos de textura arenosa e irrigação por gotejamento, os PMc's ideais podem chegar até -20 kPa. Já para solos de textura argilosa, sob o mesmo sistema de irrigação, os autores reportam PMc's ideais de até -30 kPa.

Tabela 6-6. Número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), altura de caule (AC) e diâmetro de planta (DP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca de raízes (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) para os potenciais matriciais críticos (PMc) em LVA e NR.

Tipo de solo		Variáveis							
LVA	NR	LVA	NR	LVA	NR	LVA	NR	LVA	NR
PMc	PMc	NF		DC (mm)		AC (mm)		DP (cm)	
-15	-10	9 aA	12 bB	7,7 aA	9,8 aB	38,9 aA	59,6 aB	26,4 aA	32,4 bB
-20	-15	9 aA	9 aA	8,1 aA	7,9 aA	42,3 aA	42,3 bA	27,3 aA	26,3 aA
-25	-20	9 aA	9 aA	7,3 aA	8,5 aA	45,3 aA	50,2 aB	26,1 aA	27,1 aA
-30	-25	9 aA	8 aA	7,6 aA	7,7 aA	38,4 aA	36,9 bA	25,2 aA	22,3 aA
CV (%)		16,63		18,99		18,16		14,34	
		MFPA (g)		MFR (g)		MSPA (g)		MSR (g)	
-15	-10	37,7 aA	79,7 bB	6,1 aA	7,8 aA	3,4 aA	5,0 aA	1,3 aA	1,0 aA
-20	-15	42,9 aA	37,7 aA	2,7 bA	2,7 bA	3,7 aA	3,6 abA	0,4 bA	0,4 aA
-25	-20	38,2 aA	41,1 aA	3,9 abA	2,8 bA	3,2 aA	3,3 abA	0,6 abA	0,3 bA
-30	-25	36,9 aA	26,1 aB	5,3 abA	1,2 bB	3,3 aA	2,7 bA	1,0 abA	0,2 bA
CV (%)		54,24		31,78		18,00		21,04	

Letras minúsculas diferentes na coluna entre os PMc para cada tipo de solo e maiúsculas na linha entre os LVA e NR para cada atributo diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

6.5.3 Eficiência do uso da água

No LVA/-25 kPa aplicou-se uma lâmina total de irrigação de 40,7 mm desde o transplântio até 33 DAT, o que resultou em uma EUA de $1,06 \text{ g mm}^{-1}$ (Tabela 6-7), já no LVA/-15 kPa foi aplicado 28,8 mm, resultando em uma EUA de $1,31 \text{ g mm}^{-1}$. Por sua vez, no LVA/-30 kPa aplicou-se 47,1 mm, em 5 eventos de irrigação durante o ciclo da alface, equivalendo a EUA de $1,27 \text{ g mm}^{-1}$. Apesar da frequência de irrigações no LVA/-15 kPa ter sido levemente superior em relação ao LVA/-30kPa, a lâmina total aplicada foi 38,8% inferior. Isso se deve ao fato de que a umidade no PMc LVA/-15 kPa era de 52,8% e no LVA/-30 era de 47%, o que corresponde a uma lâmina de 2,9 mm e 7,8 mm, por evento de irrigação, respectivamente. De maneira geral, as lâminas totais de irrigação e o número de irrigações foram maiores no NR em relação ao LVA em todos os PMc's avaliados (Tabela 6-7).

A maior lâmina total (177,5 mm) foi aplicada no NR/-10 kPa (Tabela 6-7), o qual obteve a maior produção de MFPA entre os PMc's avaliados (Tabela 6-6). Valeriano et al. (2016) observaram o maior peso comercial de plantas de alface a partir da aplicação de lâminas entre 116 e 118 mm ciclo⁻¹ em solo de textura franco arenosa, acima desta lâmina, não foi possível observar ganhos significativos em produção de matéria fresca. Por sua vez, Cardoso & Klar (2011) observaram maior acúmulo de matéria fresca da parte aérea com a aplicação de uma lâmina de 114 mm ciclo⁻¹, no PMc de -20 kPa em solo de textura arenosa.

O número total de irrigações em NR se mostrou notadamente dependente do PMc, onde, com o aumento de -10 para -15 kPa reduziu-se significativamente a frequência de irrigação em NR. A maior lâmina aplicada nos PMc's em NR, influenciou sobretudo, a EUA com valores abaixo de $1,0 \text{ g mm}^{-1}$ em todos os PMc's avaliados. Verifica-se que o PMc no NR/-10 kPa obteve maior EUA em NR, com a aplicação de lâmina total de 177,5 mm distribuídos em 15 eventos de irrigação, enquanto que o NR/-25 kPa resultou na menor EUA no NR com a aplicação de uma lâmina total de 140,0 mm (Tabela 6-7). Bandeira et al. (2011) afirmam que a distribuição de água e a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante todo o ciclo da cultura reduzem as perdas por drenagem e os períodos de estresse hídrico, aumentando assim a EUA em substrato composto de solo e esterco caprino com densidade média de $1,43 \text{ g cm}^{-3}$. A densidade média em NR foi de $1,29 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto que no LVA foi de $0,96 \text{ g cm}^{-3}$.

Em solos de textura arenosa, como o NR, a eficiência do uso da água é altamente influenciada pela frequência de irrigação e volume de água aplicado. Zotarelli et al., (2009)

avaliaram o manejo da irrigação em tomate cultivado em solo de textura arenosa e verificaram que a aplicação de água em baixo volume e maior frequência resultou em uma EUA de 42 kg m⁻³ enquanto que a aplicação em menor frequência e maior volume resultou em EUA de 8,7 kg m⁻³. Isso ocorre devido ao solo de textura arenosa apresentar percolação excessiva da água devido a sua reduzida capacidade de retenção de água.

Apesar da EUA no NR ter sido inferior ao LVA, a MFPA no NR/-10 kPa foi maior dentre todos os PMc's avaliados, com valor médio de 79,7 g planta⁻¹ (Tabela 6-7). A maior EUA não representa, necessariamente, aumento da produção de massa fresca, como observado por Valeriano et al. (2016), onde a aplicação de 60% da ETc em alface americana cultivada em ambiente protegido, resultou em EUA de 1,8 g mm⁻¹ e peso comercial da cabeça de 120 g planta⁻¹. Por outro lado, foi observado que a aplicação de 95,73% da ETc, resultou em EUA de 1,2 g mm⁻¹ e peso comercial da cabeça de 175,4 g planta⁻¹.

Tabela 6-7. Potenciais críticos de reposição hídrica (PMc), umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}), umidade no potencial crítico (Θ_{pc}), lâmina aplicada por evento de irrigação (LI), lâmina de irrigação aplicada antes (Inicial) e após diferenciação dos tratamentos (Irrigação), lâmina total aplicada (Total), número total de irrigações (NI) e eficiência do uso da água (EUA) em alface cultivada em embalagens preenchidas com LVA e NR em ambiente protegido.

Tipo de solo	PMc (kPa)	Θ_{cc} (%)	Θ_{pc} (%)	LI (mm)	Lâminas (mm)				EUA (g mm ⁻¹)
					Inicial	Irrigação	Total	NI	
LVA	-15	55,6	52,8	2,9	8	20,8	28,8	7	1,31
	-20	55,6	50,7	4,9	8	29,7	37,7	6	1,13
	-25	55,6	49,0	6,5	8	32,7	40,7	5	1,06
	-30	55,6	47,0	7,8	8	39,1	47,1	5	1,27
NR	-10	40,4	29,8	10,8	15	162,5	177,5	15	0,44
	-15	40,4	24,7	16,0	15	128,2	143,2	8	0,26
	-20	40,4	21,8	18,9	15	170,6	185,6	9	0,22
	-25	40,4	20,0	20,8	15	125,0	140,0	6	0,18

6.5.4 Índice de clorofila

Os índices Falker de clorofila apresentaram aumento linear em função dos potenciais críticos utilizados no LVA (Figura 6-5A), enquanto que no NR (Figura 6-5B), os índices apresentaram respostas quadráticas, indicando, nesse caso, um ponto de maximização dos teores de clorofila. Valença et al. (2018) verificaram um aumento linear da clorofila total com a redução do volume de água aplicado em alface cultivado em vasos, o que ocorreu devido ao aumento da concentração da clorofila em função da menor quantidade de folhas observada nos tratamentos de menor reposição hídrica. Comportamento semelhante foi observado nos

PMc's em NR (Tabela 6-6), onde o NF reduziu significativamente com o aumento do PMc de -10 para -15kPa. Já para o LVA, o aumento linear do teor de clorofila não alterou significativamente o NF, uma vez que os valores de NF se mantiveram constantes entre os PMc's de -15 e -30 kPa (Tabela 6-6).

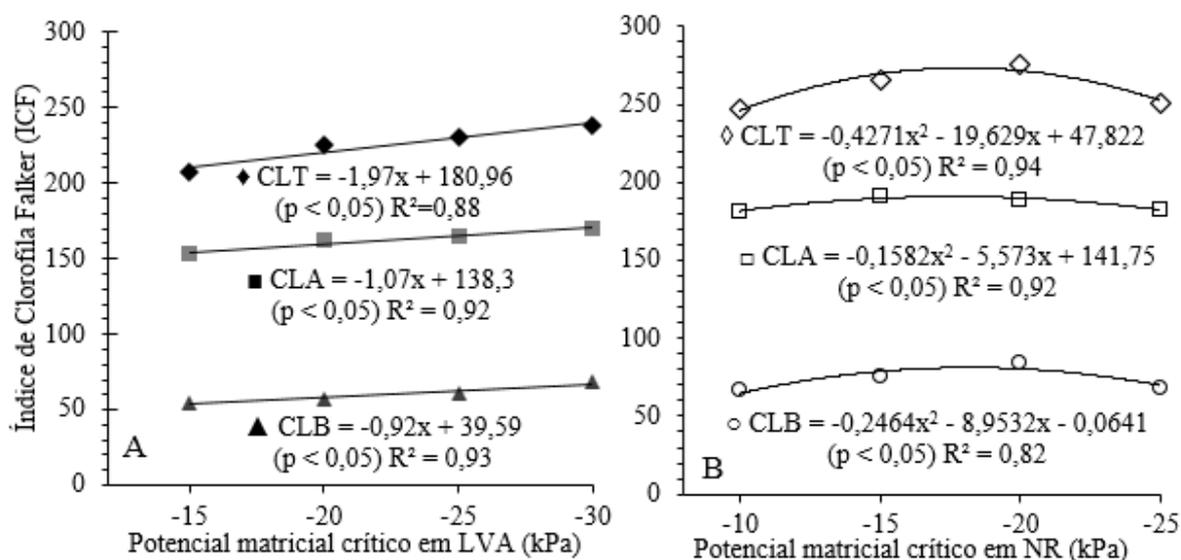


Figura 6-5. Índices Falker de clorofila a (CLA), clorofila b (CLB) e clorofila total (CLT) para o LVA (A) e NR (B), em função dos potenciais críticos de reposição hídrica em alface cultivada em ambiente protegido.

6.5.5 Análise de componentes principais

A análise de PCA é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto de dados original (Hongyu, 2015). Na análise de componentes principais, observou-se que as três primeiras componentes responderam por mais de 80% da variância acumulada (Tabela 6-8), sendo que as duas primeiras componentes foram responsáveis por 72,81% da variância explicada. As variáveis com maiores participações na primeira componente, a qual respondeu por 55,69% da variação total foram MFPA, MSPA e NF. Na segunda componente principal, que respondeu por 17,11% da variância total, as variáveis de maior peso foram MSR e MFR.

Verifica-se que praticamente todas as variáveis são responsáveis pela discriminação do grupo NR/-10 kPa, enquanto que as variáveis MSR e MFR são mais responsáveis pela discriminação dos grupos LVA/-15 e LVA/-30 kPa (Figura 6-6). Assim, os três grupos se

mostram semelhantes em relação à produção de raízes, entretanto, o grupo NR/-10 kPa é caracterizado por plantas com maior desenvolvimento da parte aérea, com maior produção de MFPA, MSPA, NF e maiores valores de AC, DC, AP e DP, enquanto que os grupos LVA/-15 e LVA/-30 kPa caracterizam-se por plantas de porte menor, mas com maior desenvolvimento de raízes devido a maior produção de MFR e MSR.

Soundy et al. (2005) avaliaram o efeito da irrigação em déficit com reposição até a capacidade de campo em alface, onde observaram que o acúmulo de massa de raízes foi semelhante entre os tratamentos, e que a aplicação da irrigação em déficit afeta de forma mais efetiva o acúmulo de peso na parte aérea em relação ao sistema radicular. Os autores afirmam que em condição de déficit hídrico moderado é provável que as raízes apresentem um maior desenvolvimento lateral e em profundidade para acessar a água em profundidade em resposta à secagem na parte mais superior do solo.

Tabela 6-8. Análise de componentes principais dos parâmetros fenométricos da alface em todos os PMc's avaliados em LVA e NR.

Componentes da variância	Componentes principais				
	1	2	3	4	5
Autovalores	4,45	1,36	0,81	0,69	0,38
Variância total explicada (%)	55,69	17,11	10,16	8,72	4,80
Variância acumulada (%)	55,69	72,81	82,98	91,70	96,51
Variáveis	Correlação com os componentes principais				
NF	0,84	-0,20	-0,18	-0,14	-0,34
MFR	0,72	0,64	0,08	0,14	0,06
DC	0,75	-0,26	-0,27	-0,17	0,48
AC	0,58	-0,32	0,22	0,69	0,03
MFPA	0,95	-0,19	-0,05	0,03	-0,03
MSR	0,56	0,81	0,01	-0,01	0,01
MSPA	0,91	-0,09	-0,17	-0,12	-0,15
DP	0,49	-0,16	0,78	-0,34	0,03

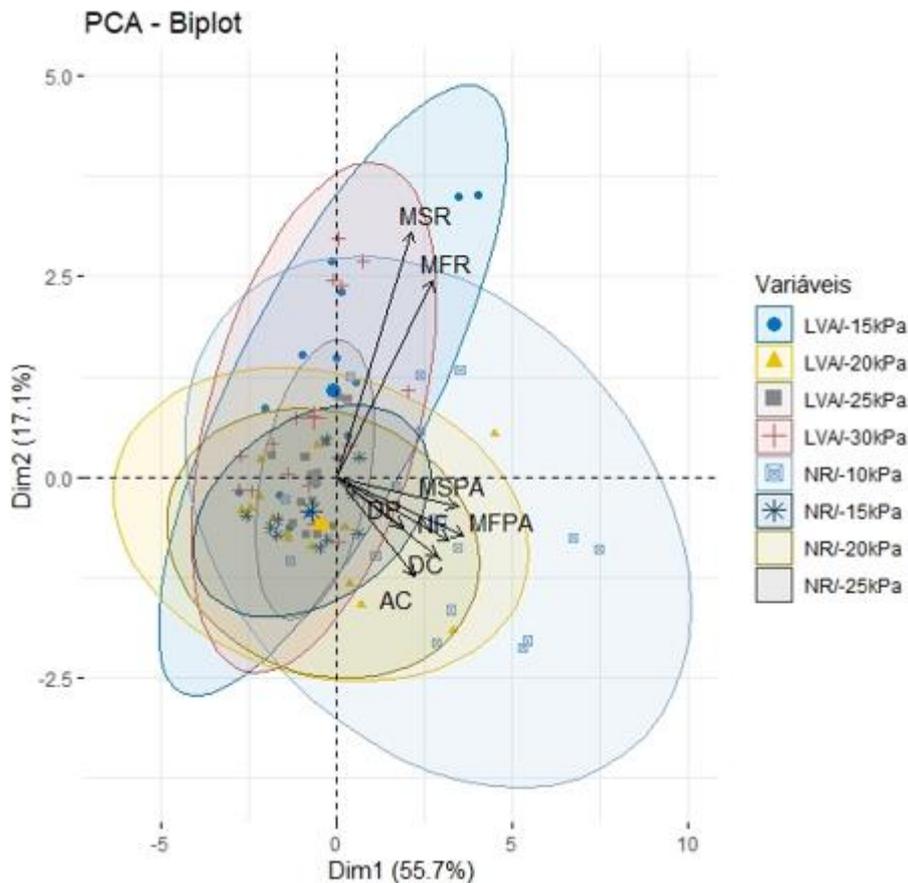


Figura 6-6. Dispersão (gráfico *biplot*) dos PMc's em LVA e NR. MSPA: Massa seca da parte aérea; MFPA: Massa fresca da parte aérea; DP: Diâmetro de plantas; NF: Número de folhas; DC: Diâmetro de caule; AC: Altura de caule; MSR: Massa seca de raízes; MFR: Massa fresca de raízes.

6.6 CONCLUSÕES

O uso de tensiômetros eletrônicos integrados a uma placa micro controladora Arduino foi capaz de monitorar, armazenar os dados de potencial matricial, acionar e interromper a irrigação em todos os potenciais matriciais críticos para alface avaliados em Latossolo Vermelho Amarelo e Neossolo Regolítico.

A maior frequência de irrigação no potencial matricial crítico de -10 kPa em Neossolo Regolítico resultou em uma maior variação nos potenciais matriciais ao final de cada evento de irrigação. Entretanto, essa frequência de irrigação resultou em uma maior eficiência do uso da água em comparação aos outros potenciais críticos em NR.

Para potencial matricial crítico maior que -15 kPa em em Neossolo Regolítico a frequência de irrigação é reduzida substancialmente, nessa condição, a eficiência do uso da água é reduzida prejudicando o acúmulo de massa fresca da alface cultivada em embalagem.

A maior eficiência do uso da água da alface ocorreu no Latossolo Vermelho Amarelo no potencial matricial de -15 kPa. Entretanto, a maior produção de massa fresca observada ocorreu no Neossolo Regolítico no potencial matricial crítico de -10 kPa.

A análise dos componentes principais mostrou que a variação da produção da parte aérea da alface esteve mais associada ao Neossolo Regolítico a -10 kPa, porém, os potenciais críticos de -15 e -30 kPa concentraram a variação do desenvolvimento de raízes em Latossolo Vermelho Amarelo, mas sem alcançar o desempenho produtivo observado no Neossolo Regolítico a -10 kPa.

6.7 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, J.; FREIRE, A. G.; ALENCAR, T. L.; SANTOS, C. L. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; BEZERRA, F. M. L.; MOTA, J. C. A. Desempenho de sistemas de leitura de tensiômetro em condições de temperatura controlada. **Irriga**, v.22, n.4, p.735-756, 2017.

BANDEIRA, G. R. L.; PINTO, H. C. S.; MAGALHÃES, P. S.; ARAGÃO, C. A.; QUIEROZ, S. O. P.; SOUZA, E. R.; SEIDO, S. L. Manejo de irrigação para cultivo de alface em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.29, n.2, p.237-241, 2011.

BIANCHI, A.; MASSERONI, D.; THALHEIMER, M. MEDICI, L. O.; FACCHI, A. Field irrigation management through soil water potential measurements: a review. **Italian Journal of Agrometeorology**, v.2, p.25-38, 2017.

BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v.14, n.10, p.19639-19659, 2014.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. Uso da tensiometria no manejo da irrigação. **Circular técnica**, Embrapa Semiárido, 2010, 28p.

CARDOSO, G. G. G.; KLAR, A. E. Fracionamento da fertirrigação e seu efeito na produção da alface sob ambiente protegido. **Irriga**, v.16, n.3, p.259-270, 2011.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, v.8, n.16, p.40-55, 2014.

DIAMANTE, M. S.; JÚNIOR SEABRA, S.; INAGAKI, A. M.; SILVA, M. B.; DALLACORT, R. Produção e resistência ao pendoamento de alfaces tipo lisa cultivadas sob diferentes ambientes. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.1, p.133-140, 2013.

GEISENHOF, L. O.; PEREIRA, G. M.; LIMA JUNIOR, J. A.; SILVA, A. L. P.; AVIZ, W. L. C. Produção de alface-americana em cultivo protegido utilizando mulching, sob diferentes tensões de água no solo. **Engenharia Agrícola**, v.36, n.1, p.46-54, 2016.

GUIMARÃES, C. M.; CUNHA, F. F.; SILVA, F. C. S.; ARAÚJO, E. D.; GUIMARÃES, A. B. F.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. J. H. Agronomic performance of lettuce cultivars submitted to different irrigation depths. **Plos One**, v.14, n.12, p.1-19, 2019.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**, Amherst, Academic Press, 1998, 801p.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v.1, n.5, p.83-90, 2015.

MASSERONI, D.; FACCHI, A.; DEPOLI, E. V.; RENGA, F. M.; GANDOLFI, C. Irrig-oh: An open-hardware device for soil water potential monitoring and irrigation management. **Irrigation and Drainage**, v.65, n.5, p.750-761, 2016.

MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S.; CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola**, v.67, p.727-730, 2010.

MONTESANO, F. F.; van IERSEL, M. W.; PARENTE, A. Timer versus moisture sensor-based irrigation control of soiless lettuce: Effects on yield, quality and water use efficiency. **Horticultural Science**, v.43, p.67-75, 2016.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; ALVARES, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999, 359p.

ROMERO, R.; MURIEL, J. L.; GARCÍA, I.; de la PEÑA, D. M. Research on automatic irrigation control: State of the art and recente results. **Agricultural Water Management**, v.114, p.59-66, 2012.

SOUNDY, P.; CANTLIFFE, D. J.; HOCHMUTH, G. J.; STOFELLA, P. J. Management of nitrogen and irrigation in lettuce transplant production affects transplant root and shoot development and subsequent crop yields. **Horticultural Science**, v.40, n.3, p.607-610, 2005.

TARGA, M. S.; SILVA, M. C.; CEZAR, V. R. S. Uso de microcontrolador Arduino para a determinação da permeabilidade do solo. **Revista Técnica de Ciências Ambientais**, v.1, n.1, p.1-14, 2019.

TURNER, N. C. Imposing and maintaining soil water deficits in drought studies in pots. **Plant and Soil**, v.439, p.45-55, 2018.

VALENÇA, D. C.; CARVALHO, D. F.; REINERT, F.; AZEVEDO, R. A.; PINHO, C. A.; MEDICI, L. O. Automatically controlled deficit irrigation on lettuce in “organic potponics”. **Scientia Agricola**, v.75, n.1, p.52-59, 2018.

van GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-897, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

van GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**, Washington, Environmental Protection Agency, 1991. 100 p.

VALERIANO, T. T. B.; SANTANA, M. J.; OLIVEIRA, A. F.; MACHADO, L. J. M. Alface americana cultivada em ambiente protegido submetida a doses de potássio e lâminas de irrigação. **Irriga**, v.21, n.3, p.620-630, 2016.

VIANA, S. B. A.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; SOARES, F. A. L.; CARNEIRO, P. T. Índices morfofisiológicos e de produção de alfaces sob estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, n.1, p.23-30, 2004.

VILLAS BOAS, R. C.; CARVALHO, J. A.; GOMES, L. A. A.; SOUSA, A. M. G.; RODRIGUES, R. C.; SOUZA, K. J. Avaliação técnica e econômica da produção de duas cultivares de alface tipo crespa em função de lâminas de irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.2, p.525-531, 2008.

ZOTARELLI, L.; SCHOLBERG, J. M.; DUKES, M. D.; MUÑOZ-CARPENA, R.; ICERMAN, J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a Sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. **Agricultural Water Management**, v.96, p.23-34, 2009.

CAPÍTULO III

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE EM TRÊS TIPOS DE SOLO DO CERRADO

7 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE EM TRÊS TIPOS DE SOLO DO CERRADO

7.1 RESUMO

Sensores de umidade do solo tem possibilitado novas soluções de automação e informatização na agricultura. Entretanto, sua utilização ainda necessita de calibrações para atestar sua acurácia na estimativa da umidade do solo. Assim, objetivou-se avaliar o sensor capacitivo SKU:SEN0193 integrado ao microcontrolador Arduino. A calibração foi realizada a partir da relação entre a umidade volumétrica e a tensão de saída dos sensores em amostras deformadas de Latossolo Vermelho Amarelo (LVa), Neossolo Regolítico (NR) e Latossolo Vermelho (LV) da região do Cerrado, Distrito Federal, Brasil. A calibração dos sensores resultou em modelos polinomiais de segundo grau com R^2 entre 0,93 e 0,96 para LVa, 0,89 e 0,92 para NR e 0,86 e 0,88 para LV. O erro quadrático médio (RMSE) foi de 0,08, 0,12 e 0,15 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para o LVa, NR e LV, respectivamente. Sensores atuando na tensão de operação de 5,0 V apresentam menor variabilidade de leituras com coeficiente de variação (CV) entre 0,21 e 1,54%, enquanto que sensores de 3,3 V apresentam CV's entre 3,27 e 17,84%. Recomenda-se a calibração individual do sensor SKU:SEN193 de forma específica para cada tipo de solo para obtenção de estimativas confiáveis do conteúdo de água em LVa, NR e LV.

Palavras chave: Conteúdo de água no solo, prototipagem eletrônica, sonda de capacitância

7.2 ABSTRACT

Soil moisture sensors enabled new automation and computerization solutions in agriculture. However, its use still requires prior calibrations to attest its accuracy to estimate soil moisture. Thus, in this study a prototype for soil moisture monitoring was developed using the capacitive sensor SKU:SEN0193 integrated with the Arduino microcontroller. The prototype was calibrated based on the relationship between volumetric moisture and sensor output voltage in deformed samples of Red-yellow Latosol (RYL), Regolitic Neosol (RN), and Red Latosol (RL) of the Cerrado region, Federal District, Brazil. The calibration of sensors resulted in second-degree polynomial models with R^2 between 0.93 and 0.96 for RYL, 0.89 and 0.92 for RN, and 0.86 and 0.88 for RL. Root mean square errors (RMSE) of volumetric moisture were 0.08, 0.12, and 0.15 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ for RYL, RN, and RL, respectively. Sensors at operating voltage of 5.0 V showed less variability of readings, with coefficient of

variation (CV) between 0.21 and 1.54%, while sensors at 3.3 V showed CVs between 3.27 and 17.84%. It is recommended to calibrate the SKU:SEN0193 sensor specifically for each soil type in order to obtain reliable estimates of water content for RYL, RN, and RL.

Keywords: soil water content; electronic prototyping; capacitance probe

7.3 INTRODUÇÃO

A umidade do solo é um parâmetro importante no crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas e depende principalmente das propriedades físicas do solo e das condições meteorológicas existentes. O método gravimétrico é o mais preciso para obtenção do conteúdo de água no solo, entretanto, é destrutivo, trabalhoso e não fornece os dados de umidade em tempo real (Adla et al., 2020). Nesse sentido, existe uma demanda contínua por dados de umidade do solo em aplicações hidrológicas, ambientais e agrícolas, o que têm levado ao desenvolvimento de métodos indiretos não destrutivos para a medição do conteúdo de água no solo. Nos métodos indiretos as medições são realizadas pela associação de variáveis mensuráveis que variam com o teor de umidade do solo, como por exemplos a sonda de nêutrons, reflectometria no domínio do tempo e frequência (TDR e FDR), tensiometria, capacitância, atenuação de raios gama, bloco resistivo de cápsula porosa, radar de penetração de superfície (GPR), entre outros (Lekshmi et al., 2014). Cada método indireto de estimativa da umidade do solo apresenta características distintas no que se refere ao custo, precisão, tempo de resposta e parâmetro de medição associado ao conteúdo de água no solo (Dobriyal et al., 2012), bem como a necessidade de calibração de alguns desses métodos, o que exige, na maioria das vezes, elevado conhecimento técnico.

O método da sonda de capacitância é uma técnica não destrutiva, em que o conteúdo de água no solo é estimado medindo-se a capacitância entre eletrodos inseridos no solo. A sonda é submetida a uma excitação elétrica em uma frequência pré-determinada para medir a constante dielétrica aparente do solo (Placidi et al., 2020). Sensores capacitivos exploram o contraste dielétrico entre a água e o solo, onde os solos secos possuem permissividade dielétrica aparente entre 2 e 6, enquanto que na água é de aproximadamente 80 (Martinez & Barnes, 2001). A sonda de capacitância fornece o valor absoluto de umidade em qualquer profundidade e em tempo real (Dukes et al., 2010), porém para Villwock (2004) a calibração é exigida especialmente em Latossolos, devido aos altos teores de Fe e argila e a expansibilidade do solo. Coelho et al. (2006) ressaltam que os modelos de calibração variam

conforme o tipo de solo e que modelos polinomiais podem ser ajustados com considerável exatidão.

O modelo de calibração consiste no estabelecimento da relação entre a resposta do sensor e um valor de referência. Uma vez que esta relação é estabelecida, o modelo de calibração é aplicado de forma reversa, ou seja, realiza a predição do valor de referência a partir da resposta do sensor (Burke, 2020). A acurácia da calibração é a medida de quão próximas às estimativas do sensor estão do valor real, ou também pode ser definida como a diferença máxima que existe entre um valor medido e um valor verdadeiro determinado a partir de um procedimento padrão (Carr et al., 2001).

O sensor SKU:SEN0193 (DFROBOT, Shanghai, China), é um sensor capacitivo de umidade do solo de baixo custo, de fácil aquisição no mercado e opera na faixa entre 3.0 e 5,5 V. O sensor pode facilmente ser integrado a microcontroladores de código aberto, como Arduino, ESP32 e outros. Em comparação a sensores capacitivos disponíveis no mercado brasileiro, o sensor SKU:SEN0193 pode ser adquirido à um custo que varia entre R\$ 4,00 e R\$ 30,00 por unidade, enquanto que outros sensores comerciais não são adquiridos por menos de R\$ 250,00 por unidade. Entretanto, os componentes advindos do mercado de eletrônicos de baixo custo geralmente carecem de informações técnicas detalhadas e a sua utilização deve ser feita com avaliações prévias que atestem sua funcionalidade e suas especificações técnicas (Chan et al., 2020). Placidi et al., (2020) observaram que o sensor SKU:SEN0193 quando utilizado em um solo sem variação de densidade aparente produz uma relação confiável entre o sinal de saída e o conteúdo gravimétrico de água em solo arenoso na região da Perugia, Itália. Nagahaje et al. (2019) avaliaram o mesmo sensor e observaram erros quadráticos médios de $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ em solo orgânico na região de Saitama, Japão. Contudo, ainda não existem estudos que avaliem este sensor quanto à sua capacidade de estimativa do conteúdo de água em solos da região do Cerrado brasileiro.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o sensor SKU:SEN0193 na estimativa do conteúdo de água em amostras deformadas de Latossolo Vermelho Amarelo, Neossolo Regolítico e Latossolo Vermelho da região do Cerrado no Distrito Federal. Para isso, modelos de calibração que relacionam o sinal de saída do sensor com a variação da umidade volumétrica foram desenvolvidos e testados para cada tipo de solo.

7.4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nos Laboratórios de Física do Solo e no de Análise de Água da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília no período entre outubro e novembro de 2020.

7.4.1 Sensor capacitivo e plataforma Arduino

Avaliou-se nove unidades de sensor capacitivo de umidade do solo modelo SKU:SEN0193 (DFRobot, Shanghai, China), integrando-os ao microcontrolador Arduino. O documento técnico do fabricante (*datasheet*), informa que o sensor possui dimensões de 9,8 x 2,3 cm, opera na faixa de voltagem entre 3,3 e 5,0 V, com voltagem de saída entre 0 e 3,0 V, corrente de operação de 5 mA e possui peso de 15 g (Figura 7-1).

Placidi et al. (2020) realizaram uma caracterização elétrica do sensor SKU:SEN0193 e observaram que a capacitância do sensor no ar é da ordem de 6.5 pF. Radi et al. (2018) verificaram que a frequência do sensor varia de 260 Hz em solo úmido, até 520 Hz para solo com baixa umidade.

A placa controladora utilizada foi uma Arduino Mega 2560, a qual possui o microcontrolador ATmega2560, 54 pinos digitais de *input/output*, 16 portas analógicas com resolução de 10 bits, oscilador de 16 MHz, conexão USB e pino *jack* de alimentação (Figura 7-1).

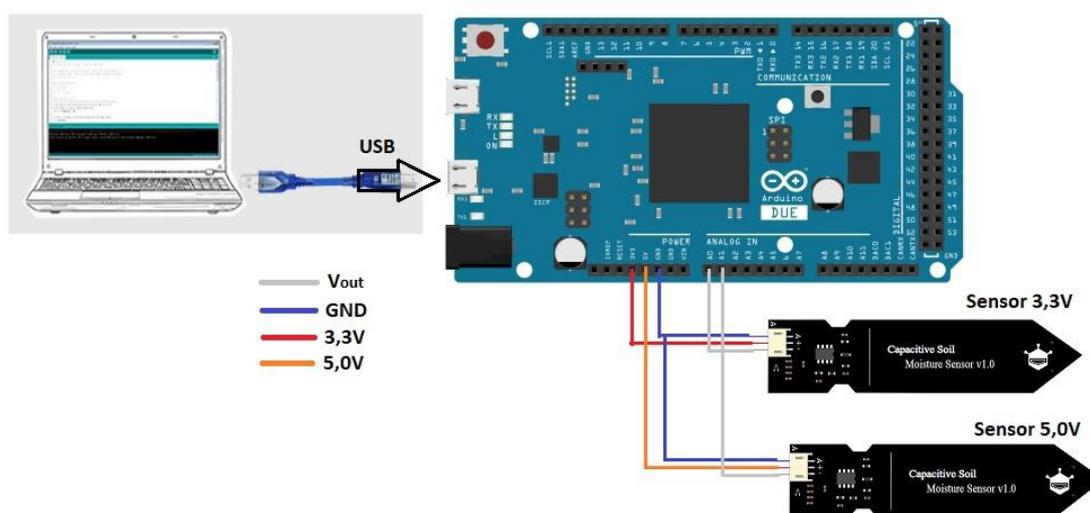


Figura 7-1. Conexão entre os sensores capacitivos SKU:SEN0193 de 3,3 e 5,0 V com a placa microcontroladora Arduino MEGA 2560.

A verificação da tensão de operação dos sensores foi realizada antes da instalação nas amostras de solo, a partir de leituras em ar e água. Esse procedimento foi realizado para verificar o funcionamento dos sensores antes de sua instalação no solo. O sinal elétrico de saída do sensor (V_{out}) foi visualizado em monitor serial da IDE do Arduino, a partir da conversão dos valores analógicos em voltagem. Para isso foi criada uma variável do tipo *float* que armazena a conversão obtida pela Equação 1.

$$float V_{out} = sensorValue * \left(\frac{V_{in}}{1023}\right) \quad (1)$$

em que V_{out} = voltagem de saída do sensor; *sensorValue* = sinal analógico do sensor; V_{in} = tensão de entrada de alimentação do sensor, 1023 = fator de conversão analógico-digital.

Após a verificação de funcionamento dos sensores, verificou-se que seis sensores apresentaram valores de V_{out} apenas quando operados na tensão V_{in} de 3,3 V e outros três funcionaram apenas quando conectados à V_{in} de 5,0 V. Isso definiu a avaliação de três sensores em Latossolo Vermelho Amarelo, três em Neossolo Regolítico, ambos operando com V_{in} de 3,3 V e três em Latossolo Vermelho operando com V_{in} de 5,0 V.

7.4.2 Amostras de solo e corpos de prova

Foram utilizadas amostras deformadas de Latossolo Vermelho Amarelo (LVa) coletado em área de cultivo de milho (15°56'56,32" S; 47°55'46,16" O), Latossolo Vermelho (LV) de área de Cerrado Natural (15°57'30,0" S; 47°55'08,6" O) e Neossolo Regolítico (NR) coletado em área de Cerrado Natural (15°58'48,27" S; 47°56'57,54" O), ambas na profundidade de 0 a 0,2 m e peneirados em malha #2,0 mm e secos ao ar livre.

Os corpos de prova empregados na calibração dos sensores consistiram de nove tubos de PVC, sendo três para cada tipo de solo, de diâmetro interno de 6,97 cm e altura de 9,86 cm. Após preenchimento com solo os corpos de prova foram colocados para saturação por capilaridade durante 24 h, em seguida, os sensores foram inseridos na parte central de cada um dos corpos de prova, os quais foram mantidos em temperatura ambiente para secagem do solo para obtenção dos dados de calibração, onde, durante o ciclo de secagem foram obtidos os dados de V_{out} dos sensores, concomitantemente ao peso do conjunto corpo de prova+sensor (Figura 7-2). Posteriormente, o peso do conjunto foi corrigido para obtenção do peso do solo úmido contido no corpo de prova, o qual foi adotado como referência para obtenção da umidade volumétrica.



Figura 7-2. Sensores capacitivos SKU:SEN0193 instalados nos corpos de prova preenchidos com Neossolo Regolítico (A), Latossolo Vermelho (B) e Latossolo Vermelho Amarelo (C).

Após a obtenção dos dados para calibração, os corpos de prova foram novamente saturados e submetidos ao um novo ciclo de secagem, onde, nesse período foram obtidos os dados de V_{out} e peso do conjunto. Os dados do segundo ciclo de secagem foram posteriormente utilizados para validação da calibração gerada a partir dos dados obtidos no primeiro ciclo de secagem.

Posteriormente ao segundo ciclo de secagem, os sensores foram removidos dos corpos de prova e o solo foi colocado em estufa a 105 °C durante 72 h. Após a secagem do solo, a massa de solo seco foi utilizada para obtenção da densidade aparente e variação da umidade volumétrica durante os dois ciclos de secagem dos corpos de prova.

A densidade do solo foi estimada pela Equação 2 e a porosidade total pela Equação 3.

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (2)$$

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (3)$$

em que, D_s = densidade aparente do solo (g cm^{-3}); M_s = massa de solo seco em estufa (g); V_t = volume total do corpo de prova (cm^3) e D_p = densidade de partículas ($2,65 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabela 7-1).

Tabela 7-1. Propriedades físicas e granulométricas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVa), Neossolo Regolítico (NR) e Latossolo Vermelho (LV).

Tipo de solo	Argila	Silte	Areia	Textura	Ds*	Pt*
	%			g cm ⁻³	cm ³ cm ³	
LVa	59,2	36,7	4,1	argilosa	1,00	0,619
NR	14,3	8,6	77,2	franco-arenosa	1,28	0,514
LV	72,7	25,1	2,2	muito argilosa	0,94	0,643

* Valor médio dos corpos de prova para os solos avaliados.

7.4.3 Análise da variabilidade entre sensores

A variabilidade de V_{out} entre os sensores foi obtida em duas etapas, a primeira a partir da comparação entre valores de V_{out} em ar em temperatura ambiente (26 °C) e água destilada (24 °C), para isso foram utilizadas 20 leituras de cada sensor em uma análise variância univariada (ANOVA). Já estimativa do ruído de medição foi obtida a partir do coeficiente de variação dos valores de V_{out} de cada sensor (Tabela 7-2). A segunda etapa ocorreu durante a obtenção dos dados de umidade volumétrica (Θ [cm³ cm⁻³]) em LVa, NR e LV, onde aplicou-se a metodologia utilizada por Adla et al. (2020), com a utilização do coeficiente de correlação de Spearman entre os valores de V_{out} e Θ (Tabela 7-2). A correlação de Spearman foi empregada por se tratar de um teste não paramétrico que mede a força da relação monotônica entre dados pareados sem qualquer pressuposição a respeito da distribuição dos dados e da natureza da relação física existente entre eles (Hauke & Kossowski, 2011).

Tabela 7-2. Equações utilizadas para obtenção do coeficiente de variação (CV) e coeficiente de correlação de Spearman para análise da variabilidade entre sensores capacitivos SKU:SEN0193 em ar, água destilada e amostras deformadas de LVa, NR e LV.

Índice estatístico	Equação
Coeficiente de variação (%)	$CV = \frac{S}{\bar{V}} * 100$
Coeficiente de correlação de Spearman (r_s)	$r_s = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(V_i) - R(\bar{V}_i))(R(\theta_i) - R(\bar{\theta}_i))}{\sqrt{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(V_i) - R(\bar{V}_i))^2)(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R(\theta_i) - R(\bar{\theta}_i))^2)}}$

S = desvio padrão dos valores de V_{out} ; \bar{V} = valor médio de V_{out} ; V_i = valor de V_{out} ; θ_i = valor de umidade volumétrica observada; $R(x)$ = ranqueamento de x e n é o número de pontos de dados utilizados no cálculo de r_s .

7.4.4 Calibração e validação dos sensores capacitivos

A umidade volumétrica (Equação 4) do solo obtida por gravimetria foi adotada como valor de referência, enquanto que a voltagem de saída (V_{out}) dos sensores capacitivos foi adotada como valor de resposta do sensor para predição da variação de umidade do solo.

$$\theta_v = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_2} \right) * D_s \quad (4)$$

em que, θ_v = umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); M_1 = massa de solo úmido em cada medição (g); M_2 = massa de solo seco, obtida ao final das medições após secagem do solo em estufa a 105 °C (g) e D_s = densidade aparente do solo em cada corpo de prova (g cm^{-3}).

Os dados de umidade obtidos por gravimetria foram comparados aos dados de V_{out} dos sensores gerando modelos polinomiais de calibração de segundo grau e analisadas a partir do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e pelo teste de significância dos coeficientes.

Para a avaliação da acurácia dos sensores foram adotados modelos de regressão linear simples, onde a umidade volumétrica obtida por gravimetria foi comparada com a umidade volumétrica estimada pelo sensor. Os índices estatísticos utilizados para a quantificação da acurácia são apresentados na Tabela 7-3.

Tabela 7-3. Índices estatísticos para avaliação da acurácia dos modelos de calibração.

Índice estatístico	Equação	Alcance (valor ideal)
Coeficiente de determinação (R^2)	$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	0 a 1 (1)
Erro médio absoluto (MAE)	$MAE = \left(\sum_{i=1}^n O_i - P_i \right) / n$	0 a ∞ (0)
Erro quadrático médio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right) / n}$	0 a ∞ (0)

O_i = valor de umidade volumétrica observada; P_i = valor de umidade volumétrica estimado pelo sensor após ajuste pelo modelo de calibração; n = número de observações.

7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.5.1 Variabilidade entre sensores

Os valores médios de V_{out} em ar e água dos seis sensores operando com V_{in} de 3,3 V foi de 2,92 V e 1,67 V, respectivamente e dos três sensores com V_{in} de 5,0 V foi de 3,78 V e 2,34 V, respectivamente. Os resultados do teste F demonstram a ocorrência de variações

significativas de V_{out} entre todos os sensores avaliados (Tabela 7-4). Entretanto, ao se analisar os valores do coeficiente de variação (CV), verifica-se que os sensores de 3,3 V apresentam maior variação, principalmente quando o sensor está em contato com a água destilada. Apesar da variabilidade significativa, os resultados obtidos pelos sensores de 5,0 V_{out} apresentam CV's significativamente inferiores aos verificados nos sensores de 3,3 V, tanto em ar quanto em água, o que indica uma maior estabilidade e reprodutibilidade. Nagahaje et al. (2019) avaliaram a variabilidade entre sensores SKU:SEN0193 em solos com alto teor de matéria orgânica e verificaram variabilidade significativa e coeficientes de variação 0,05 e 0,1% em amostras de solo com 80% de umidade.

Tabela 7-4. ANOVA e coeficiente de variação (CV) de V_{out} do sensor SKU:SEN0193 de 3,3 V_{in} e 5,0 V_{in} obtidos em ar a 26 °C e em água destilada a 24 °C.

Sensor com V_{in} de 3,3 V					
Condição	Fonte de variação	GL*	Soma dos quadrados (V_{out})	Quadrado médio (V_{out})	F
Ar	V_{out}	5	1,0644	0,21288	858***
	Resíduo	114	0,0283	0	
	CV (%)	3,27			
Água	V_{out}	5	10.588	2,118	158302***
	Resíduo	114	0,002	0	
	CV (%)	17,84			
Sensor com V_{in} de 5,0 V					
Ar	V_{out}	2	0,00331	0,00165	159,9***
	Resíduo	57	0,00059	0	
	CV (%)	0,21			
Água	V_{out}	2	0,08275	0,04138	6289***
	Resíduo	57	0,00037	0	
	CV (%)	1,54			

* Graus de liberdade; ***Significativo $p < 0,001$.

Em todos as relações entre Θ e V_{out} , o coeficiente de correlação de Spearman (r_s) foi negativo e significativo ao nível de 5% (Tabela 7-5). Os sensores apresentaram r_s médio de - 0,81, - 0,84 e - 0,97 em LVA, NR e LV, respectivamente. As maiores diferenças de r_s entre V_{out} e Θ foram observadas nos sensores em LVA e NR, ambos operados na tensão de 3,3 V, enquanto que os sensores em LV, operados na tensão de 5,0 V apresentaram correlações acima de - 0,9 e diferenças mínimas entre os valores de r_s . Adla et al. (2020) avaliaram a correlação entre a umidade volumétrica e a estimada por sensores capacitivos comerciais modelos SMEC300 e SM100 (Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL, USA) em solos de

textura arenosa e franco-siltosa, obtendo-se valores médios de r_s , de 0,92 e 0,94, respectivamente.

Tabela 7-5. Coeficiente de correlação de Spearman (r_s) entre a voltagem de saída (V_{out}) dos sensores e a variação da umidade volumétrica (Θ) em amostras deformadas de LVa, NR e LV.

Tipo de Solo	Amostra dos Sensores (S) (repetições)			Média
	S1	S2	S3	
	r_s			
LVa 3,3 v	- 0,78	- 0,98	- 0,68	- 0,81
NR 3,3 v	- 0,72	- 0,97	- 0,84	- 0,84
LV 5,0 v	- 0,98	- 0,98	- 0,97	- 0,97

7.5.2 Calibração dos sensores capacitivos

Os modelos ajustados em LVa e NR, ambos utilizando sensores de 3,3 V, apresentaram curvas de ajuste com variações distintas para a mesma faixa de umidade do solo. Apesar das diferenças entre os modelos (Figura 7-3), as equações em LVa e NR apresentaram coeficientes significativos ao nível de 1%. Já os modelos ajustados em LV com sensor de 5,0 V, apresentaram as menores diferenças entre as curvas e valores dos coeficientes. Entretanto, verifica-se que os coeficientes dos modelos em LV, apresentaram significâncias entre 1 e 5%, indicando a necessidade da calibração individual dos sensores, em ambos os solos avaliados. A utilização de sensores de umidade sem prévia calibração pode resultar em estimativas errôneas do conteúdo de água no solo, o que pode trazer impactos negativos em estudos de drenagem, manejo de irrigação e dinâmica da água no solo (Lima et al., 2018).

Os modelos quadráticos se mostraram adequados ao ajuste dos dados de calibração, entretanto, este não é o comportamento usual deste sensor, o qual em outros estudos apresentou modelos de calibração distintos ao apresentado neste estudo. Radi et al. (2018), avaliaram o sensor SKU:SEN0193 em solo de textura franco arenosa e observaram modelos exponenciais de calibração. Os autores ainda constataram que a variação de temperatura ambiente entre 26 e 40 °C, apesar de não alterar significativamente o modelo de ajuste, pode trazer pequenas alterações nos coeficientes das equações de calibração. Já em solo rico em matéria orgânica, Nagahaje et al. (2019), em condições de laboratório, ajustaram um modelo polinomial de terceiro grau para calibração do sensor SKU:SEN0193.

No LVa (Figura 7-3A), observa-se variação na umidade do solo entre 0,2 e 0,5 cm³ cm⁻³, com distintos valores de V_{out} entre os três sensores (repetições). Este comportamento é

geralmente relatado como resultado da influência de dois fatores, granulometria e densidade aparente do solo (Lima et al., 2018). Uma vez que o solo das amostras de LVa possui a mesma distribuição granulométrica, a diferença de densidade pode ter influenciado nas respostas dos sensores. As densidades aparentes do solo nos corpos de prova para os sensores S1, S2 em LVa foram de 1,02 e 1,03 g cm⁻³, respectivamente, já o sensor S3 em LVa, em amostra com densidade de 0,95 g cm⁻³ apresentou valores de V_{out} sempre acima dos observados nas amostras S1 e S2, as quais com densidades mais próximas entre si, apresentaram respostas mais similares quando comparadas ao S3. Os resultados em NR também evidenciam valores distintos de V_{out} entre os sensores para a faixa de umidade entre 0,1 e 0,4 cm³ cm⁻³, mas com menor discrepância quando comparado aos sensores em LVa, além do que, a densidade aparente do solo das amostras em NR foi de 1,29, 1,28 e 1,28 g cm⁻³ para os corpos de prova dos sensores S1, S2 e S3, respectivamente.

A menor diferença entre as densidades em NR pode ter reduzido o efeito da variação dos valores de V_{out}, entretanto, a diferença entre as respostas pode estar associada a variabilidade intrínseca, como constatado no estudo da variabilidade entre os sensores utilizados em NR (Tabela 7-6), onde os valores de r_s variaram entre - 0,72 e -0,97. Por outro lado, os sensores de 5,0 V em LV apresentaram valores de V_{out} mais próximos para uma variação de umidade entre aproximadamente 0,2 e 0,6 cm³ cm⁻³ e as densidades aparentes para os sensores S1, S2 e S3 em LV foram de 0,94, 0,95 e 0,94 g cm⁻³, respectivamente.

Os valores de R²_{aj.} dos modelos ajustados em LVa foram de 0,96, 0,93 e 0,96 para os sensores S1, S2 e S3, respectivamente (Figura 7-3a). Em NR os valores de R²_{aj.} também se foram acima de 0,9 em todos os modelos ajustados (Figura 7-3b). Em LV, os valores de R²_{aj.} ficaram de abaixo de 0,9 em todos os modelos ajustados (Figura 7-3c), entretanto, verifica-se uma maior semelhança entre as curvas ajustadas. Lima et al. (2018) avaliaram sensores capacitivos de umidade do solo modelo CS616 (Campbell Scientific Inc., Utah, USA-CSI) em amostras deformadas e indeformadas de Argissolo Amarelo e Cambissolo Háplico na região de Cruz das Almas – BA e, utilizando equações de calibração obtidas por gravimetria em amostras deformadas, observaram valores de R² de 0,67 para modelo exponencial, 0,83 para modelo linear e 0,93 para modelo quadrático.

A partir destes resultados, constata-se que a calibração do sensor SKU:SEN0193 deve levar em consideração a variabilidade entre sensores instalados no mesmo tipo de solo, uma vez que as respostas podem estar relacionadas não somente à densidade aparente, mas também a características construtivas destes sensores que resultam em uma variabilidade de

valores de V_{out} para uma mesma faixa de umidade do solo. Outro fator que aparentemente melhora o desempenho do sensor SKU:SEN0193 integrado ao microcontrolador Arduino, é a sua utilização na tensão V_{in} de 5,0 V, como demonstrado no estudo de variabilidade entre sensores e no comportamento das curvas de calibração (Tabelas 7-4 e 7-5 e Figura 7-3).

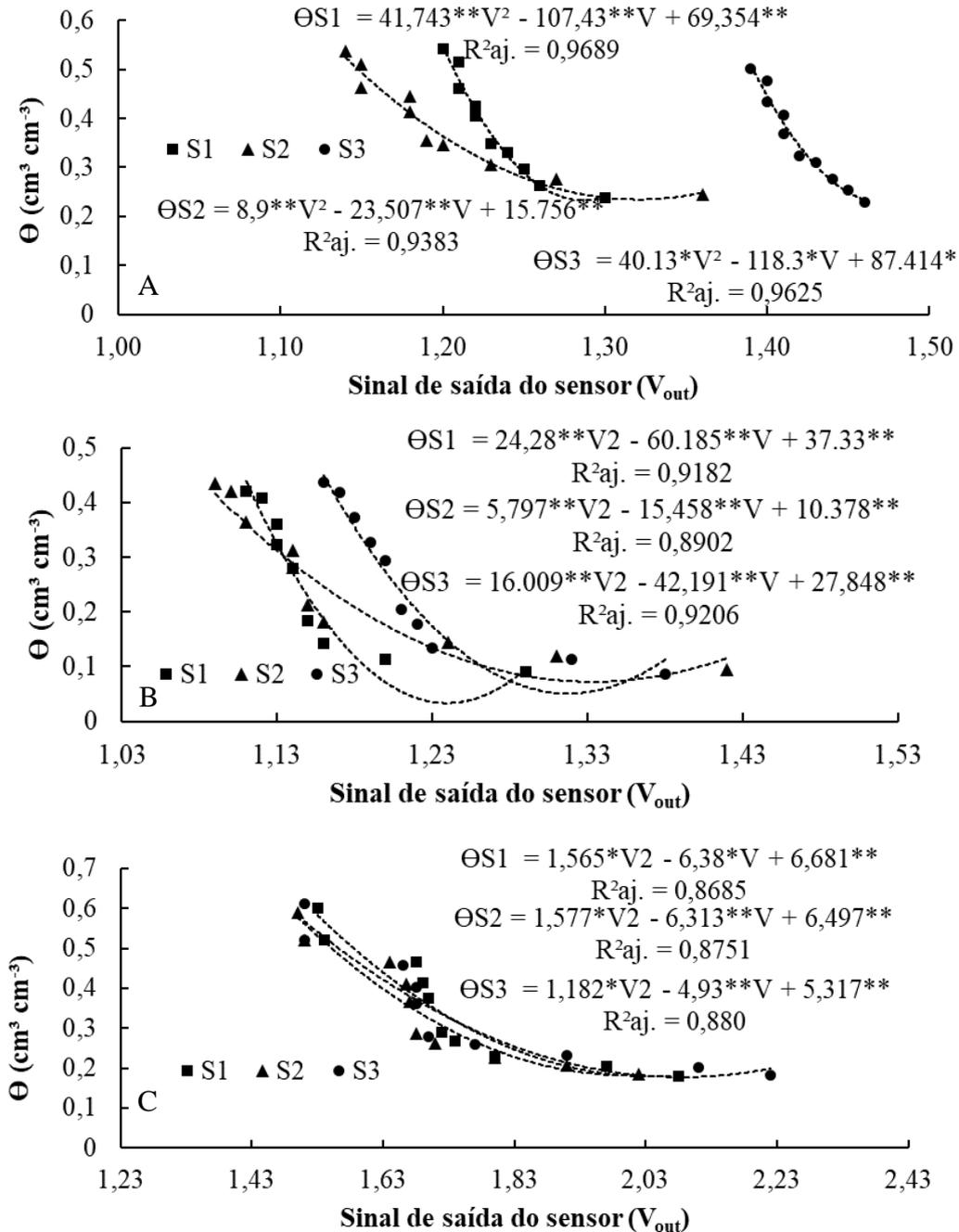
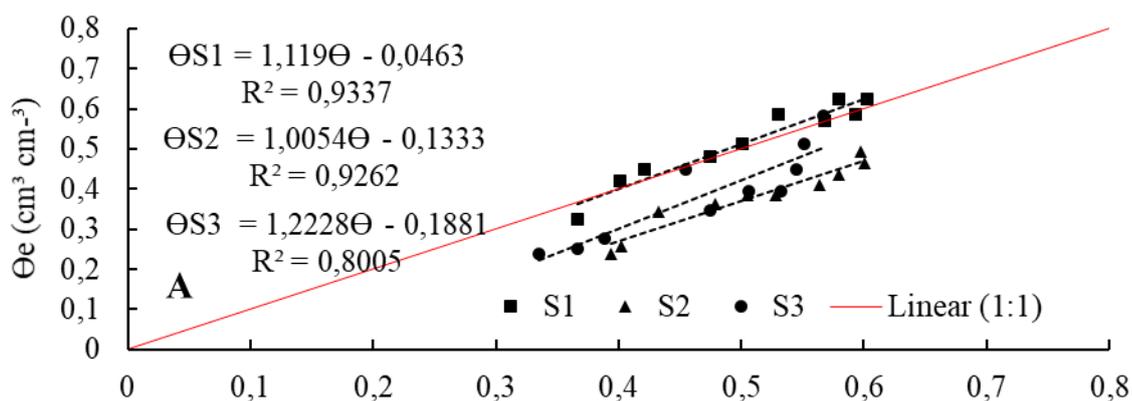


Figura 7-3. Equações de calibração para os sensores capacitivos em LVa 3,3 v (A), NR 3,3 v (B) e LV 5,0 v (C). S1: Sensor 1; S2: Sensor 2; S3: Sensor 3. **Significativo a $p < 0,01$; * significativo a $p < 0,05$

7.5.3 Validação da calibração

Na análise comparativa entre os valores de R^2 e da linha 1:1 entre os dados de umidade volumétrica observados (eixo X) e estimados (eixo Y) pelos sensores (Figura 7-4), os melhores ajustes foram observados nos sensores em LVa com valores de R^2 entre 0,92 e 0,93 para os sensores S1 e S2, respectivamente (Figura 7-4A), sendo que o sensor S1 apresentou os menores desvios em relação à reta 1:1. Já o sensor S3, apresentou um desempenho inferior em relação aos demais sensores em LVa com R^2 de 0,80. A avaliação dos sensores em NR (Figura 7-4B) apresentou desempenho inferior aos modelos de calibração, onde os valores de R^2 foram de 0,73, 0,86 e 0,88 para os sensores S3, S1 e S2, respectivamente. Em comparação à reta 1:1, os três sensores em NR apresentam desvios sistemáticos com subestimativa dos valores observados de umidade volumétrica.

Os sensores em LV apresentaram comportamento similar, com R^2 de 0,81, 0,85 e 0,83 para os sensores S1, S2 e S3, respectivamente (Figura 7-4C). A subestimativa dos valores observados, constatada pela relação dos ajustes à reta 1:1 foi similar entres os sensores avaliados em LV. Nagahaje et al (2019) observaram subestimativas de umidade volumétrica do sensor SKU:SEN0193 em solo orgânico em leituras entre 0,2 e 0,6 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Este comportamento foi observado em comparação à umidade volumétrica obtida por gravimetria e ao sensor SM-200 (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK).



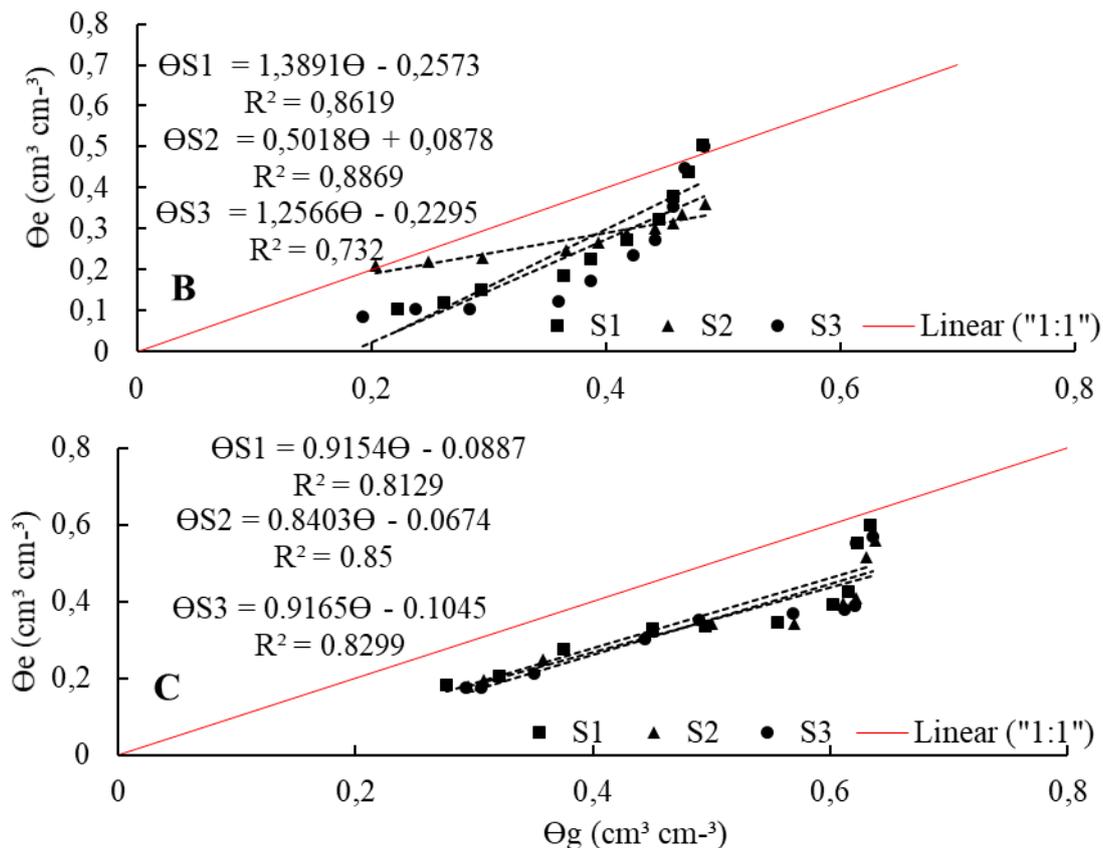


Figura 7-4. Validação da calibração aplicada aos sensores instalados em amostras deformadas de Latossolo Vermelho Amarelo (A), Neossolo Regolítico (B) e Latossolo Vermelho (C).

Os valores de Erro Quadrático Médio (RMSE) em ambos os tipos de solo evidenciaram comportamentos distintos entre os sensores (Tabela 7-6). Os menores valores de RMSE de 0,02 e 0,08 cm³ cm⁻³ foram observados nos sensores S1 e S3 em LVa, respectivamente. Os demais sensores nos três tipos de solo apresentam valores de RMSE semelhantes, com variação entre 0,11 e 0,15 cm³ cm⁻³ entre os três tipos de solo. Os três sensores avaliados em LV mostraram valores de RMSE semelhantes entre si, mas distintos em relação ao LVa e NR, o que sugere a necessidade de calibração específica para cada tipo de solo.

Tabela 7-6. Índices estatísticos de acurácia para os sensores avaliados em amostras deformadas de LVa, NR e LV, coeficiente de determinação (R^2), Erro Médio Absoluto (MAE [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]) e Erro Quadrático Médio (RMSE [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]).

Sensor	LVa			NR			LV		
	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE
S1	0,93	0,02	0,02	0,86	0,11	0,12	0,81	0,13	0,14
S2	0,92	0,13	0,13	0,88	0,10	0,11	0,85	0,14	0,15
S3	0,80	0,08	0,09	0,73	0,13	0,15	0,82	0,14	0,15

Adla et al. (2020) avaliaram sensores capacitivos de baixo custo, modelos SMEC300 e SM100 (Spectrum Technologies Inc.), e obtiveram valores de RMSE para solos de textura arenosa entre 0,11 e 0,08 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para o sensor SMEC300 e entre 0,10 e 0,08 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para o sensor SM100. Nagahaje et al. (2019), observaram que o sensor SKU:SEN0193 em solo com alto teor de matéria orgânica, apresenta valores de RMSE de 0,09 e 0,07 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para amostras de solo seco e saturadas, respectivamente. Os autores também recomendam a calibração específica para cada tipo de solo uma vez que a acurácia se mostrou dependente do material constituinte do solo. Considerando uma ordem de performance de sensores entre os tipos de solo, obteve-se valores médios de Erro Médio Absoluto (MAE) de 0,07, 0,11 e 0,13 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para os sensores avaliados em LVa, NR e LV, respectivamente.

7.6 CONCLUSÕES

A partir da integração entre sensores capacitivos e a placa Arduino foi possível obter a variação da umidade volumétrica do solo em tempo real. A umidade volumétrica foi correlacionada com a tensão de saída dos sensores fornecendo uma relação efetiva entre a leitura do sensor e o conteúdo de água no solo.

A variabilidade entre sensores deve ser considerada no procedimento de calibração, uma vez as leituras podem apresentar repostas distintas para a mesma condição de umidade. Nesse sentido, recomenda-se a operação dos sensores na tensão de 5,0 V a qual foi capaz de reduzir a variabilidade de leitura entre sensores.

A calibração do sensor SKU:SEN193 se mostrou específica para cada tipo de solo e densidade aparente. De modo geral o sensor apresenta subestimativas em relação à umidade volumétrica observada, independentemente do tipo de solo e da densidade aparente.

7.7 REFERÊNCIAS

ADLA, S.; RAI, N. K.; KARUMANCHI, S. H.; TRIPATHI, S.; DISSE, M.; PANDE, S. Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very-low cost resistive soil moisture sensors. **Sensors**, v.20, n.263, p.1-27, 2020.

BURKE, S. **Regression and Calibration**, 2020, LCGC Europe Online Supplement. Disponível em: <https://www.webdepot.umontreal.ca/Usagers/sauves/MonDepotPublic/CHM%203103/LCGC%20Eur%20Burke%202001%20-%202%20de%204.pdf> . Acesso em 5 de Dezembro de 2020.

CHAN, K.; SCHILLEREFF, D. N.; BAAS, A. C. W.; CHADWICK, M. A.; MAIN, B.; MULLIGAN, M.; et al. Low-cost electronic sensors for environmental research: Pitfalls and opportunities. **Progress in Physical Geography**, v.25, p.1-34, 2020.

CARR, J. J.; BROWN, J. M. **Basic Theories of Measurement**. In *Introduction to Biomedical Equipment Technology*, 4^a ed. Pearson, Londres, 2001, 743p.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. & LEDO, C.A.S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.23-30, 2006

DOBRIYAL P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hidrology**, v.458, p.110-117, 2012.

DUKES, M. D.; ZOTARELLI, L.; MORGAN, K.T. Use of irrigation Technologies for vegetable crops in Florida. **Horttechnology**, v.20, n.1, p.133-142, 2010.

HAUKE, J.; KOSSOWSKI, T. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. **Quaestiones Geographicae**, v.30, n.2, 2011.

LEKSHMI, S.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v.54, p.92-105, 2014.

LIMA, J. G. A.; OLIVEIRA, A. S.; SOUZA, L. S.; SILVA, N. D.; VIANA, P. C. Calibration of soil a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.10, p.696-701, 2018.

MARTINEZ, A. L.; BARNES, A. P. Modeling dielectric-constant values of geologic materials. **Current Research in Earth Sciences, Kansas Geological Survey, Bulletin 247**, p.1-16, 2001.

NAGAHAJE, E. A. A. D.; NAGAHAJE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v.9, n.141, p.1-10, 2019.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v.20, n.3585, p.1-14, 2020.

RADI. MURTININGRUM. NGADISIH. MUZDRIKAH, F. S.; NUHA, M. S.; RIZQI, F. A. Calibration of capacitive soil moisture sensor (SKU:SEN0193). **Anais**, 4th International Conference on Science and Technology, Yogyakarta, Indonésia, p.1-7, 2018.

ROWLANDSON, T. L.; BERG, A. A.; BULLOCK, P. R.; OJO, E. R.; McNAIRN, H.; WISEMAN, G.; COSH, M. H. Evaluation of several calibration procedures for a portable soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v.498, p.335-344, 2013.

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

8 APÊNDICE

PROGRAMAÇÃO UTILIZADA PARA CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO IDE ARDUINO V.1.8.9.

```
Void setup () {
// inicialização da porta serial em 9600 bits por segundo
Serial.begin(9600);
}
Void loop () {
//leitura da porta analógica no pino A0:
Int sensorValue = analogRead (A0);
//conversão do sinal digital em pressão kPa:
Float kPa = (((sensorValue*5.0)/1023.0)-0.200)/0.006429);
//conversão da pressão em voltagem:
Float Vout = (5*(0.0012858*kPa+0.04));
String dataString = "";
dataString += (kPa);
dataString += ("kPa");
dataString += ("/t");
dataString += (Vout);
dataString += ("mV");
Serial.println (dataString);
Delay(5000); //delay entre leituras para melhor estabilidade
}
```

PROGRAMAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO EM FUNÇÃO DE POTENCIAIS MATRICIAIS CRÍTICOS

```
//Bibliotecas necessárias para funcionamento dos componentes do sistema:
#include <SPI.h> //biblioteca datalogger
#include <SD.h> //biblioteca datalogger
#include <Wire.h> //biblioteca DHT
#include <DS3231.h> //biblioteca relógio
#include <SimpleTimer.h>
#include <LinkedList.h>
```

```

#include <Gaussian.h> //biblioteca média móvel
#include <GaussianAverage.h>
//Construção da média móvel de ordem 10:
GaussianAverage LVA/E1 (10);
GaussianAverage LVA/E2 (10);
GaussianAverage LVA/E3 (10);
GaussianAverage LVA/E4 (10);
GaussianAverage NR/E1 (10);
GaussianAverage NR/E2 (10);
GaussianAverage NR/E3 (10);
GaussianAverage NR/E4 (10);
//Pinagem dos módulos relés:
int rele1 = 43; //LVA/E4
int rele2 = 41; //LVA/E3
int rele3 = 39; //LVA/E2
int rele4 = 37; //LVA/E1
int rele5 = 42; //NR/E4
int rele6 = 40; //NR/E3
int rele7 = 38; //NR/E2
int rele8 = 36; //NR/E1
int releBomba = 27;
const int chipSelect = 53; //define o pino CS do datalogger
DS3231 clock; //cria a variável DS3231 do tipo clock
RTCDateTime dt; //comando necessário para biblioteca funcionar, cria a variável dt
SimpleTimer irriga;
//Variáveis para armazenamento dos valores de potencial crítico:
const int VT4S1 = 30;
const int VT3S1 = 25;
const int VT2S1 = 20;
const int VT1S1 = 15;
const int VT1S2 = 10;
const int VT2S2 = 15;
const int VT3S2 = 20;
const int VT4S2 = 25;
//Variáveis para o tempo de Irrigação:
int tempoIrriga1 = 340; // LVA/E4
int tempoIrriga2 = 289; // LVA/E3
int tempoIrriga3 = 224; // LVA/E2
int tempoIrriga4 = 135; // LVA/E1
int tempoIrriga5 = 194; // NR/E4
int tempoIrriga6 = 181; // NR/E3
int tempoIrriga7 = 159; // NR/E2
int tempoIrriga8 = 117; // NR/E1
void ligaIrriga();
void grava();
void espera();
unsigned long tempoA = 0;
unsigned long tempoB = 0;
bool acionarA = false;

```

```

bool acionarB = false;
void setup() {
  Serial.begin(9600); //Inicia a comunicação com a Serial em 9600/
  Wire.begin();
  irriga.setInterval(6000, ligaIrriga);
  Serial.println("Iniciando Leitura");
  clock.begin();
  clock.setDateTime(__DATE__, __TIME__);
  dt = clock.getDateTime();//o objeto dt criado acima recebe os valores lidos pelo DS3231
  SD.begin(chipSelect);
  //Seleção das portas analógicas de entrada (Tensiômetros):
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT);
  pinMode(A8, INPUT);
  pinMode(A9, INPUT);
  pinMode(A5, INPUT);
  pinMode(A6, INPUT);
  pinMode(A7, INPUT);
  //Seleção das portas relé para acionamento dos solenoides:
  pinMode(rele1, OUTPUT);
  pinMode(rele2, OUTPUT);
  pinMode(rele3, OUTPUT);
  pinMode(rele4, OUTPUT);
  pinMode(rele5, OUTPUT);
  pinMode(rele6, OUTPUT);
  pinMode(rele7, OUTPUT);
  pinMode(rele8, OUTPUT);
  pinMode(releBomba, OUTPUT);
  digitalWrite(rele1, HIGH);
  digitalWrite(rele2, HIGH);
  digitalWrite(rele3, HIGH);
  digitalWrite(rele4, HIGH);
  digitalWrite(rele5, HIGH);
  digitalWrite(rele6, HIGH);
  digitalWrite(rele7, HIGH);
  digitalWrite(rele8, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
//Programa de execução da automação de Irrigação:
void ligaIrriga() {
  if (acionarA) {
    int v1 = analogRead(A0);
    delay(400);
    int v2 = analogRead(A1);
    delay(400);
    int v3 = analogRead(A2);
    delay(400);
    int v4 = analogRead(A8);

```

```

delay(400);
int v5 = analogRead(A9);
delay(400);
int v6 = analogRead(A5);
delay(400);
int v7 = analogRead(A6);
delay(400);
int v8 = analogRead(A7);
delay(400);
float value1a = (((v1 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value1 = (((0.9995*value1a)+2.9885);
delay(400);
float value2a = (((v2 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value2 = (((0.9995*value2a)+2.9885);
delay(400);
float value3a = (((v3 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value3 = (((0.9995*value3a)+2.9885);
delay(400);
float value4a = (((v4 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value4 = (((0.9995*value4a)+2.9885);
delay(400);
float value5a = (((v5 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value5 = (((0.9995*value5a)+2.9885);
delay(400);
float value6a = (((v6 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value6 = (((0.9995*value6a)+2.9885);
delay(400);
float value7a = (((v7 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value7 = (((0.9995*value7a)+2.9885);
delay(400);
float value8a = (((v8 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value8 = (((0.9995*value8a)+2.9885);
delay(400);
T1S1 += value1;
T1S1.process();
T2S1 += value2;
T2S1.process();
T3S1 += value3;
T3S1.process();
T4S1 += value4;
T4S1.process();
T1S2 += value5;
T1S2.process();
T2S2 += value6;
T2S2.process();
T3S2 += value7;
T3S2.process();
T4S2 += value8;
T4S2.process();

```

```

##### SISTEMA 1 T4S1 (LVA/E4) #####/
if (T4S1.mean > VT4S1) {
  digitalWrite(rele1, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga1; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele1, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 2 T3S1 (LVA/E3) #####/
if (T3S1.mean > VT3S1) {
  digitalWrite(rele2, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga2; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele2, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 3 T2S1 (LVA/E2) #####/
if (T2S1.mean > VT2S1) {
  digitalWrite(rele3, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga3; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele3, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 4 T1S1 (LVA/E1) #####/
if (T1S1.mean > VT1S1) {
  digitalWrite(rele4, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga4; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele4, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 5 T4S2 (NR/E4) #####/
if (T4S2.mean > VT4S2) {
  digitalWrite(rele5, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga5; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele5, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}

```

```

}
##### SISTEMA 6 T3S2 (NR/E3) #####
if (T3S2.mean > VT3S2) {
  digitalWrite(rele6, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga6; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele6, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 7 T2S2 (NR/E2) #####
if (T2S2.mean > VT2S2) {
  digitalWrite(rele7, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga7; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele7, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 8 T1S2 (NR/E1) #####
if (T1S2.mean > VT1S2) {
  digitalWrite(rele8, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga8; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele8, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
tempoA = millis();
acionarA = false;
}
} // fim do void irriga
//Programa de execução do armazenamento dos dados
void grava() {
  if (acionarB) {
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
      Serial.println("Card failed, or not present");
      return;
    }
    float v1 = analogRead(A0);
    delay(400);
    float v2 = analogRead(A1);
    delay(400);
    float v3 = analogRead(A2);
    delay(400);
    float v4 = analogRead(A8);

```

```

delay(400);
float v5 = analogRead(A9);
delay(400);
float v6 = analogRead(A5);
delay(400);
float v7 = analogRead(A6);
delay(400);
float v8 = analogRead(A7);
delay(400);
int value1a = (((v1 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
int value1;
value1 = ((0.9995 * value1a) + 2.9885);
delay(400);
float value2a = (((v2 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value2 = ((0.9995 * value2a) + 2.9885);
delay(400);
float value3a = (((v3 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value3 = ((0.9995 * value3a) + 2.9885);
delay(400);
float value4a = (((v4 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value4 = ((0.9995 * value4a) + 2.9885);
delay(400);
float value5a = (((v5 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value5 = ((0.9995 * value5a) + 2.9885);
delay(400);
float value6a = (((v6 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value6 = ((0.9995 * value6a) + 2.9885);
delay(400);
float value7a = (((v7 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value7 = ((0.9995 * value7a) + 2.9885);
delay(400);
float value8a = (((v8 / 1023.0) - 0.04) / 0.0012585);
float value8 = ((0.9995 * value8a) + 2.9885);
delay(400);
T1S1 += value1;
T1S1.process();
delay(400);
T2S1 += value2;
T2S1.process();
delay(400);
T3S1 += value3;
T3S1.process();
delay(400);
T4S1 += value4;
T4S1.process();
delay(400);
T1S2 += value5;
T1S2.process();
delay(400);

```

```

T2S2 += value6;
T2S2.process();
delay(400);
T3S2 += value7;
T3S2.process();
delay(400);
T4S2 += value8;
T4S2.process();
delay(400);
dt = clock.getDateTime();// o objeto dt criado acima recebe os valores lidos pelo DS3231
String dataString = "";//Inicia uma string, dataString, onde serão inseridos os valores a
serem gravados
dataString += (dt.year); //+= e o comando usado para somar um valor aos valores já
existentes dentro da dataString
dataString += ("/");
dataString += (dt.month);
dataString += ("/");
dataString += (dt.day);
dataString += ("\t");//separação de valores por tab
dataString += (dt.hour);
dataString += (":");
dataString += (dt.minute);
dataString += (":");
dataString += (dt.second);
dataString += ("\t");
dataString += (" Temp: ");
int sensor = clock.readTemperature();
dataString += String(sensor);//a função String transforma o valor entre parentese em uma
string, não e obrigatório.
dataString += ("\t");
dataString += ("T1S1: ");
dataString += String(T1S1.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("T2S1: ");
dataString += String(T2S1.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("T3S1: ");
dataString += String(T3S1.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("T4S1: ");
dataString += String(T4S1.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("T1S2: ");
dataString += String(T1S2.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("T2S2: ");
dataString += String(T2S2.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("T3S2: ");

```

```

dataString += String(T3S2.mean);
dataString += ('\t');
dataString += ("T4S2: ");
dataString += String(T4S2.mean);
dataFile = SD.open("DATALOG.txt", FILE_WRITE);//abre o cartão SD, procura e abre o
documento "datalog.txt", caso não exista ele cria o arquivo.
if (dataFile) {
  dataFile.println(dataString); //grava a string criada no documento de texto
  dataFile.close();//fecha o arquivo de texto, se não for fechado as informações podem não
serem salvas
}
Serial.println(dataString);//imprime na serial o valor que foi escrito no datalogger
tempoB = millis();
acionarB = false;
}
} //fim do void grava

void loop() {
  irriga.run();/*Função que inicia o processo da biblioteca SimpleTimer*/
  grava();
  espera();
}
void espera() {
  if (!acionarA && millis() - tempoA >= 120000) {
    acionarA = true;//40 minutos.
  }
  if (!acionarB && millis() - tempoB >= 10000) {
    acionarB = true; //10 segundos.
  }
}
}
//FIM.

```

PROGRAMAÇÃO PARA AUTOMAÇÃO DE IRRIGAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO SOLO MONITORADA POR SENSORES CAPACITIVOS SKU:SEN0193

```

//Bibliotecas necessárias para funcionamento dos componentes do sistema:
#include <SPI.h> //biblioteca datalogger
#include <SD.h> //biblioteca datalogger
#include <Wire.h> //biblioteca DHT
#include <DS3231.h> //biblioteca relógio
#include <SimpleTimer.h>
#include <LinkedList.h>

```

```

#include <Gaussian.h> //biblioteca média móvel
#include <GaussianAverage.h>
//Construção da média móvel de ordem 10:
GaussianAverage LVA (10); //Controle aplicado em Latossolo Vermelho Amarelo
GaussianAverage LV (10); //Controle aplicado em Latossolo Vermelho
GaussianAverage NR (10); //Controle Aplicado em Neosolo Regolítico
//Pinagem dos módulos relés:
int rele1 = 36; //LVA
int rele2 = 37; //LV
int rele3 = 38; //NR
int releBomba = 27;
const int chipSelect = 53; //define o pino CS do datalogger
DS3231 clock; //cria a variável DS3231 do tipo clock
RTCDateTime dt; //comando necessário para biblioteca funcionar, cria a variável dt
SimpleTimer irriga;
//Variáveis para armazenamento dos valores de potencial crítico:
const int VTLVA = 30; //Valor de umidade crítica para acionamento
const int VTLV = 25;
const int VTNR = 20;
//Variáveis para o tempo de Irrigação:
int tempoIrriga1 = 120; // LVA
int tempoIrriga2 = 110; // LV
int tempoIrriga3 = 100; //NR
void ligaIrriga();
void grava();
void espera();
unsigned long tempoA = 0;
unsigned long tempoB = 0;
bool acionarA = false;
bool acionarB = false;
void setup() {
  Serial.begin(9600); //Inicia a comunicação com a Serial em 9600/
  Wire.begin();
  irriga.setInterval(6000, ligaIrriga);
  Serial.println("Iniciando Leitura");
  clock.begin();
  clock.setDateTime(__DATE__, __TIME__);
  dt = clock.getDateTime();//o objeto dt criado acima recebe os valores lidos pelo DS3231
  SD.begin(chipSelect);
  //Seleção das portas analógicas de entrada (Tensiômetros):
  pinMode(A0, INPUT);//LVA: Portas analógicas para conexão do sensor
  pinMode(A1, INPUT);//LV
  pinMode(A2, INPUT);//NR
  //Seleção das portas relé para acionamento dos solenoides:
  pinMode(rele1, OUTPUT);
  pinMode(rele2, OUTPUT);
  pinMode(rele3, OUTPUT);
  pinMode(releBomba, OUTPUT);
  digitalWrite(rele1, HIGH);

```

```

digitalWrite(rele2, HIGH);
digitalWrite(rele3, HIGH);
digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
//Programa de execução da automação de Irrigação:
void ligaIrriga() {
  if (acionarA) {
    int S1 = analogRead(A0);
    float Sen1 = S1 * 5.0 /1023.0;
    float supply1 = readVcc() / 1000;
    float Sensor1 = supply1 / 5.0 * Sen1;
    delay(400);
    int S2 = analogRead(A1);
    float Sen2 = S2 * 5.0 /1023.0;
    float supply2 = readVcc() / 1000;
    float Sensor2 = supply2 / 5.0 * Sen2;
    delay(400);
    int S3 = analogRead(A3);
    float Sen3 = S3 * 5.0 /1023.0;
    float supply3 = readVcc() / 1000;
    float Sensor3 = supply3 / 5.0 * Sen3;
    delay(400);
    float value1 =((41.743*pow(Sensor1,2))-107.43*Sensor1+69.354);
    delay(400);
    float value2 =((1.577*pow(Sensor2,2))-6.313*Sensor3+6.497);
    delay(400);
    float value3=((16.009*pow(Sensor3,2))-42.191*Sensor3+27.848);
    delay(400);
    LVA += value1;
    LVA.process();
    LV += value2;
    LV.process();
    NR += value3;
    NR.process();
    ##### SISTEMA 1 (LVA) #####//
    if (LVA.mean > VTLVA) {
      digitalWrite(rele1, LOW);
      digitalWrite(releBomba, LOW);
      for (int i = 0; i < tempoIrriga1; i++) {
        delay(1000);
      }
      digitalWrite(rele1, HIGH);
      digitalWrite(releBomba, HIGH);
    }
    ##### SISTEMA 2 (LV) #####//
    if (LV.mean > VTLV) {
      digitalWrite(rele2, LOW);
      digitalWrite(releBomba, LOW);
      for (int i = 0; i < tempoIrriga2; i++) {

```

```

    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele2, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
##### SISTEMA 3 (NR) #####
if (NR.mean > VTNR) {
  digitalWrite(rele3, LOW);
  digitalWrite(releBomba, LOW);
  for (int i = 0; i < tempoIrriga3; i++) {
    delay(1000);
  }
  digitalWrite(rele3, HIGH);
  digitalWrite(releBomba, HIGH);
}
tempoA = millis();
acionarA = false;
}
} // fim do void irriga
//Programa de execução do armazenamento dos dados
void grava() {
  if (acionarB) {
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
      Serial.println("Card failed, or not present");
      return;
    }
    float S1 = analogRead(A0);
    float Sen1 = S1 * 5.0 / 1023.0;
    float supply1 = readVcc() / 1000;
    float Sensor1 = supply1 / 5.0 * Sen1;
    delay(400);
    float S2 = analogRead(A1);
    float Sen2 = S2 * 5.0 / 1023.0;
    float supply2 = readVcc() / 1000;
    float Sensor2 = supply2 / 5.0 * Sen2;
    delay(400);
    float S3 = analogRead(A3);
    float Sen3 = S3 * 5.0 / 1023.0;
    float supply3 = readVcc() / 1000;
    float Sensor3 = supply3 / 5.0 * Sen3;
    delay(400);
    float value1 = ((41.743*pow(Sensor1,2))-107.43*Sensor1+69.354);
    delay(400);
    float value2 = ((1.577*pow(Sensor2,2))-6.313*Sensor3+6.497);
    delay(400);
    float value3 = ((16.009*pow(Sensor3,2))-42.191*Sensor3+27.848);
    delay(400);
    LVA += value1;
    LVA.process();
  }
}

```

```

delay(400);
LV += value2;
LV.process();
delay(400);
NR += value3;
NR.process();
delay(400);
dt = clock.getDateTime();// o objeto dt criado acima recebe os valores lidos pelo DS3231
String dataString = "";//Inicia uma string, dataString, onde serão inseridos os valores a
serem gravados
dataString += (dt.year); //+= e o comando usado para somar um valor aos valores já
existentes dentro da dataString
dataString += ("/");
dataString += (dt.month);
dataString += ("/");
dataString += (dt.day);
dataString += ("\t");//separação de valores por tab
dataString += (dt.hour);
dataString += (":");
dataString += (dt.minute);
dataString += (":");
dataString += (dt.second);
dataString += ("\t");
dataString += (" Temp: ");
int sensor = clock.readTemperature();
dataString += String(sensor);//a função String transforma o valor entre parentese em uma
string, não e obrigatório.
dataString += ("\t");
dataString += ("Umidade LVA: ");
dataString += String(LVA.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("Umidade LV: ");
dataString += String(LV.mean);
dataString += ("\t");
dataString += ("Umidade NR: ");
dataString += String(NR.mean);
File dataFile = SD.open("DATALOG.txt", FILE_WRITE);//abre o cartão SD, procura e
abre o documento "datalog.txt", caso não exista ele cria o arquivo.
if (dataFile) {
dataFile.println(dataString); //grava a string criada no documento de texto
dataFile.close();//fecha o arquivo de texto, se não for fechado as informações podem não
serem salvas
}
Serial.println(dataString);//imprime na serial o valor que foi escrito no datalogger
tempoB = millis();
acionarB = false;
}
} //fim do void grava
void loop() {

```

```

irriga.run();/*Função que inicia o processo da biblioteca SimpleTimer*/
grava();
espera();
}
void espera() {
  if (!acionarA && millis() - tempoA >= 120000) {
    acionarA = true;//40 minutos.
  }
  if (!acionarB && millis() - tempoB >= 10000) {
    acionarB = true; //10 segundos.
  }
}
//Programa necessário para correta obtenção do sinal de saída dos sensores
long readVcc() {
  long result;
  // Read 1.1V reference against AVcc
#ifdef __AVR_ATmega32U4__    ||    defined(__AVR_ATmega1280__)    ||
defined(__AVR_ATmega2560__)
  ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX4) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
#elif defined (__AVR_ATtiny24__)    ||    defined(__AVR_ATtiny44__)    ||
defined(__AVR_ATtiny84__)
  ADMUX = _BV(MUX5) | _BV(MUX0);
#elif defined (__AVR_ATtiny25__)    ||    defined(__AVR_ATtiny45__)    ||
defined(__AVR_ATtiny85__)
  ADMUX = _BV(MUX3) | _BV(MUX2);
#else
  ADMUX = _BV(REFS0) | _BV(MUX3) | _BV(MUX2) | _BV(MUX1);
#endif
  delay(2); // Wait for Vref to settle
  ADCSRA |= _BV(ADSC); // Convert
  while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC));
  result = ADCL;
  result |= ADCH << 8;
  result = 1126400L / result; // Calculate Vcc (in mV); 1126400 = 1.1*1024*1000
  return result;
}

```