

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



THIAGO LUIZ DOS SANTOS

INSTRUMENTAÇÃO COMO SUPORTE AO MANEJO RACIONAL DA ÁGUA NA  
CULTURA DA ALFACE IRRIGADA

SÃO CRISTÓVÃO

2022

**THIAGO LUIZ DOS SANTOS**

**INSTRUMENTAÇÃO COMO SUPORTE AO MANEJO RACIONAL DA ÁGUA NA  
CULTURA DA ALFACE IRRIGADA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Inajá Francisco de  
Sousa

**COORIENTADOR:** Prof. Dr. Marcos Eric  
Barbosa Brito

**SÃO CRISTOVÃO**

2022

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

S237i Santos, Thiago Luiz dos.  
Instrumentação como suporte ao manejo racional da água na cultura da alface irrigada / Thiago Luiz dos Santos; orientador Inajá Francisco de Sousa. – São Cristóvão, SE, 2022.  
105 f.; il.

Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)  
– Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Meio Ambiente. 2. Agricultura. 3. Irrigação agrícola. 4. Solos - Umidade. I. Sousa, Inajá Francisco de, orient. II. Título.

CDU 504:631

**THIAGO LUIZ DOS SANTOS**

**INSTRUMENTAÇÃO COMO SUPORTE AO MANEJO RACIONAL DA ÁGUA NA  
CULTURA DA ALFACE IRRIGADA**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre pelo  
Programa de Pós-Graduação em  
Desenvolvimento e Meio Ambiente da  
Universidade Federal de Sergipe.

Aprovada em 30 de agosto de 2022

Documento assinado digitalmente  
 INAJA FRANCISCO DE SOUSA  
Data: 25/09/2022 16:58:23-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

**Prof. Dr. Inajá Francisco de Sousa – Universidade Federal de Sergipe**  
**Presidente-orientador**

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS ERIC BARBOSA BRITO  
Data: 28/09/2022 15:09:51-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

**Prof. Dr. Marcos Eric Barbosa Brito – Universidade Federal de Sergipe**  
**Coorientador**

---

**Prof. Dr. Gregório Guirada Faccioli – Universidade Federal de Sergipe**  
**Examinador interno**

---

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Gabriela de Queiroz – Universidade do Estado de Minas Gerais**  
**Examinadora externa**

---

**Prof. Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos – Universidade Federal de Alagoas**  
**Examinador Externo**

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente concluído no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Documento assinado digitalmente  
 INAJA FRANCISCO DE SOUSA  
Data: 25/09/2022 16:50:18-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Inajá Francisco de Sousa – Orientador  
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente - PRODEMA  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS ERIC BARBOSA BRITO  
Data: 28/09/2022 15:11:35-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Marcos Eric Barbosa Brito – Coorientador  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos - PRORH  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) responsável pelo Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta Dissertação e emprestar ou vender tais cópias.

Documento assinado digitalmente  
 THIAGO LUIZ DOS SANTOS  
Data: 27/09/2022 23:24:56-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Thiago Luiz dos Santos - Autor  
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

Documento assinado digitalmente  
 INAJA FRANCISCO DE SOUSA  
Data: 25/09/2022 16:54:58-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Inajá Francisco de Sousa – Orientador  
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA  
Universidade Federal de Sergipe – UFS

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS ERIC BARBOSA BRITO  
Data: 26/09/2022 15:05:31-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Marcos Eric Barbosa Brito – Coorientador  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos – PRORH  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

Dedico a todas as agricultoras e agricultores pela dedicação, diária e ininterrupta, em abastecerem as mesas de todos com alimentação de cada dia.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre dar direcionamento e discernimento nas escolhas e decisões.

À minha mãe pela confiança e compreensão durante todo esse ciclo, devido as minhas ausências.

Aos meus familiares, principalmente meu pai, Luiz Augusto, e meu irmão Luciano, que “arregaçaram as mangas” e vivenciaram esse momento ao me acompanhar na pesquisa em campo.

Agradeço a minha amada Irane, por suportar esta fase de altos e baixos, me apoiando sempre que possível e quando impossível também.

Ao meu orientador, professor Dr. Inajá, pela condução tranquila e organizada desse processo, por ser paciente e estar sempre disponível, certo nas decisões, inclusive na escolha dos profissionais que pudessem contribuir no direcionamento da pesquisa.

Ao meu coorientador, professor Dr. Marcos Eric, por toda a dedicação, condução e orientação, disponibilidade, além de ter me proporcionado um aprendizado acerca de uma área totalmente inédita para mim.

Ao Sr. Marcos Vinícius, peça fundamental para a realização dos trabalhos no laboratório, sempre solícito e companheiro.

A professora Dr<sup>a</sup> Isidória, pelas orientações e por ceder acesso ao espaço mesmo com as dificuldades impostas pela pandemia.

Ao Msc. Idamar, pelas sugestões na reta final.

A Raimundo e Luma, alunos de Engenharia Agrônômica do Campus Sertão, do grupo de estudos em salinidade e irrigação (GESI), que acompanharam de perto as atividades em campo, contribuindo com o desenvolvimento da pesquisa.

À turma da pandemia do Mestrado em Desenvolvimento em Meio Ambiente (PRODEMA), em especial Augusto, Cleriston, Dayanara, Ézio, Flávia, Lázaro, Renata, Ruana, e outros que, em meio ao cenário pandêmico, foram fortes e solidários, agradeço pelas vivências e experiências compartilhadas.

Aos professores Dr<sup>a</sup>. Maria Gabriela, Dr. Gregório e Dr. Márcio Aurélio, pela leitura atenciosa na fase de qualificação, pelas contribuições e observações valiosas que proporcionaram o melhoramento desta pesquisa.

A protagonista da pesquisa, a Senhora Maria José de Jesus Oliveira, conhecida como Maria da Horta, responsável, admiradora e incentivadora da agricultura orgânica no Estado, permitindo a realização desse projeto e pela disposição em seguir até o final para a realização dessa nossa pesquisa.

A todos os professores do PRODEMA, pelos ensinamentos e oportunidades de conhecimento.

Ao apoio financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

## RESUMO

A demanda por água excede a sua disponibilidade natural, notadamente em regiões semiáridas, já que é um recurso limitado sendo tal demanda cada dia maior em virtude do crescimento populacional e econômico, sendo a agricultura irrigada a principal consumidora do recurso. Deste modo, tornam-se necessárias melhorias na eficiência no uso da água, o que pode ser alcançada por meio do monitoramento da umidade do solo a partir de sistemas de baixo custo e fácil manuseio. Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa foi empregar microcontroladores associados a sensores de umidade do solo, vazão e volume de água, para o manejo da irrigação na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) no município de Nossa Senhora da Glória, região de clima semiárido, no Estado de Sergipe, como ferramenta de suporte à otimização do uso da água irrigada na agricultura familiar. O sistema é composto por sistema SCADA, módulos conversores USB/RS-485 e RS-485/TTL, microcontrolador Arduino, sensores de umidade HD-38, sensor de vazão/volume YF-S201, regulador de tensão step-down Lm2596 e cabo de rede par trançado 24AWG. O sistema conseguiu atender os objetivos ao monitorar as variáveis de umidade do solo, volume acumulado e o funcionamento da rede (scan) e, em conjunto com o sistema SCADA, possibilitou maior organização e tratamento dos dados através de análises e comparações gráficas. Foram analisadas as características do solo (textura e curva de retenção hídrica) para então proceder com a calibração dos sensores. Para a calibração do sensor de umidade, foi adotado o método gravimétrico direto (padrão estufa) para a determinação da umidade, cujos resultados foram comparados com os fornecidos pelos sensores. Com os dados de umidade e do sinal analógico, foram construídas curvas de calibração, por meio de interpolação linear. Os modelos quadráticos obtidos para a estimativa da umidade em solos da região foram considerados significativos ao nível de 95% de probabilidade, representando adequadamente a relação entre as variáveis umidade do solo e a resposta do sensor resistivo, em termos de sinal analógico de saída. Os dois ciclos de cultivo tiveram duração de 60 dias, entre a semeadura, transplântio e colheita. O sistema de irrigação utilizado foi localizado por gotejamento por gravidade. As lâminas de irrigação foram aplicadas usando um delineamento experimental em faixas. A cultura da alface respondeu significativamente a todas as lâminas aplicadas no primeiro ciclo, sendo a lâmina de 480 mm a que apresentou os melhores resultados para as variáveis analisadas: massa fresca da planta, massa fresca da parte aérea, diâmetro da cabeça da alface, índice SPAD, clorofila, massa seca da raiz, massa seca da parte aérea, diâmetro do caule e número de folhas. Houve maior consumo de água no segundo ciclo, quando a irrigação aconteceu com base nas informações do sistema, no entanto, apresentou aumento significativo no número de folhas por planta, característica importante comercialmente. Sendo assim, a inserção de um sistema que monitore a umidade do solo e equipamentos que possam gerar informações com acurácia e de baixo custo, auxiliarão a agricultura familiar a desempenhar um papel socioeconômico e cultural, buscando fortalecer a interação do homem com o meio ambiente, adequando-a a um modelo sustentável, com a aplicação de tecnologia disruptiva no manejo da irrigação.

**Palavras-chave:** manejo da irrigação, instrumentação na agricultura, agricultura familiar.

## ABSTRACT

The demand for water exceeds its natural availability, notably in semi-arid regions, since it is a limited resource and such demand is increasing every day due to population and economic growth, with irrigated agriculture being the main consumer of the resource. Thus, improvements in water use efficiency become necessary, which can be achieved by monitoring soil moisture from low-cost and easy-to-handle systems. So, this research aims to employ microcontrollers associated with sensors of soil moisture, flow and water volume, for irrigation management in lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the municipality of Nossa Senhora da Glória, region of semi-arid climate, in the State of Sergipe, as a support tool for optimizing the use of irrigated water in family farming. The system consists of a SCADA system, USB/RS-485 and RS-485/TTL converter modules, Arduino microcontroller, HD-38 humidity sensors, YF-S201 flow/volume sensor, Lm2596 step-down voltage regulator and cable 24AWG twisted pair network. The system was able to meet the objectives by monitoring the variables of soil moisture, accumulated volume and the operation of the network (scan) and, together with the SCADA system, allowed greater organization and treatment of data through analysis and graphical comparisons. Soil characteristics (texture and water retention curve) were analyzed to then proceed with the calibration of the sensors. For the calibration of the humidity sensor, the direct gravimetric method (stove standard) was adopted to determine the humidity, whose results were compared with those provided by the sensors. With the humidity data and the analog signal, calibration curves were constructed using linear interpolation. The quadratic models obtained to estimate soil moisture in the region were considered significant at the 95% probability level, adequately representing the relationship between the soil moisture variables and the resistive sensor response, in terms of analog output signal. The two cultivation cycles lasted 60 days, between sowing, transplanting and harvesting. The irrigation system used was located by gravity drip. Irrigation depths were applied using a striped experimental design. The lettuce culture responded significantly to all the blades applied in the first cycle, being the blade of 480 mm the one that presented the best results for the analyzed variables: plant fresh mass, aerial part fresh mass, lettuce head diameter, SPAD index, chlorophyll, root dry mass, shoot dry mass, stem diameter and number of leaves. There was greater water consumption in the second cycle, when irrigation was based on system information, however, there was a significant increase in the number of leaves per plant, an important commercial characteristic. Thus, the insertion of a system that monitors soil moisture and equipment that can generate information with accuracy and low cost, will help family farming to play a socioeconomic and cultural role, seeking to strengthen the interaction of man with the environment, adapting it to a sustainable model, with the application of disruptive technology in irrigation management.

**Keywords:** irrigation management, instrumentation in agriculture, family farming.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 – Ilustrações da localização da área do experimento. A) Mapa do Brasil, com destaque ao estado de Sergipe; B) Mapa de Sergipe com destaque ao município de Nossa Senhora da Glória (SE); C) Mapa de Nossa Senhora da Glória com destaque a área experimental; D) Imagem aérea da área do experimento.....39
- Figura 02 – Série histórica das variáveis meteorológicas, referente ao período de 1990 a 2020. Nossa Senhora da Glória, SE, Brasil.....40
- Figura 03 – A) Sensor de umidade HD-38; B) Módulo com circuito integrado LM393.....45
- Figura 04 – Circuito eletrônico do módulo do sensor de umidade integrado ao LM393.....46
- Figura 05 – Sensor de vazão YF-S201.....47
- Figura 06 – Esquema do sensor de efeito *hall*.....47
- Figura 07 – Trado tipo Uhland utilizado para coleta de amostras do solo.....49
- Figura 08 – A) Solução de amostra com adição de hidróxido de sódio; B) Agitador elétrico de Wagner da Tecnal, modelo TE-147; C) Proveta graduada de 1000ml com solução da amostra; D) Densímetro de *Bouyoucos*.....50
- Figura 09 – Triângulo textural para o solo da área de estudo. Em destaque (círculos vermelhos) a classificação textural: ArF (areia franca); FAr (franco arenosa). Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....51
- Figura 10 – Equipamentos utilizados para determinar as tensões de retenção de água no solo: A) Mesa de tensão da Eijkelkamp; B) Extrator de Richards da SondaTerra.....52
- Figura 11 – Curva de retenção de água no solo da área experimental. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....54
- Figura 12 – Temperaturas mínimas, máximas e precipitações diárias durante o primeiro e segundo ciclos de cultivo (do transplântio à colheita). Nossa Senhora da Glória (SE), 2022.....56

Figura 13 – Desenho esquemático da área do experimento.....	58
Figura 14 – A) Mudas de alface crespa ( <i>Lactuca sativa</i> L.) com 21 dias; B) Área do experimento imediatamente após o transplântio das mudas de alface; C) Área do experimento no dia das coletas das amostras.....	59
Figura 15 – Amostras de alface organizadas para processamento de coleta das variáveis no Laboratório Multiusuário da UFS/Campus Sertão.....	64
Figura 16 – Equipamentos utilizados: A) medidor de área foliar a laser, modelo CI-200, da CID Bio-science®; B) medidor eletrônico de clorofila, modelo CHL PLUS, da atLEAF®; C) paquímetro digital da Clarke® para medição do diâmetro do caule.....	65
Figura 17 – Esquema do sistema implantado na área experimental.....	67
Figura 18 – Tela principal do sistema supervisor ScadaBR.....	68
Figura 19 – Gráficos com exemplos de dados de umidade coletados pelo sistema de aquisição.....	69
Figura 20 – Sensor de vazão/volume instalado a montante de bifurcação em “Y”.....	70
Figura 21 – Umidade volumétrica calculada para a curva de retenção na profundidade de 0-20 cm em função da umidade volumétrica estimada pelo modelo de VAN GENUCHTEN, a partir do software RStudio.....	71
Figura 22 – Interpolação da conversão do sinal analógico para porcentagem.....	71
Figura 23 – Curvas obtidas com as respectivas equações de calibração dos sensores modelo HD-38, para os cinco canteiros na profundidade de 0-20 cm.....	72
Figura 24 – Display com informações para orientar a irrigação. A) Umidade instantânea do solo; B) Vazão na linha de irrigação; C) Volume de água acumulado; D) Tempo de irrigação necessário para atingir a capacidade de campo; E) Umidade na capacidade de campo; F) Umidade crítica.....	75

Figura 25 – Variáveis de crescimento: massa fresca da planta (A), massa fresca da parte aérea (B) e diâmetro médio da cabeça (C) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	77
Figura 26 – Variáveis fisiológicas: Índice SPAD (A), clorofila (B), área foliar da amostra (C) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	79
Figura 27 – Variáveis de produção: Massa seca da raiz (A), massa seca do caule (B), massa seca das folhas (C), diâmetro do caule (D) e número de folhas (E) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	82
Figura 28 – Matriz de correlação de Pearson a partir das variáveis de produção da alface quando irrigada com a lâmina de 480 mm no primeiro ciclo e quando irrigada com a lâmina obtida no manejo com os sensores no segundo ciclo. Nossa Senhora da Glória, 2022.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição granulométrica e classificação dos solos coletados. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	51
Tabela 02 – Tabela da curva de retenção a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980). Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	54
Tabela 03 – Variáveis do teste de uniformidade. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	61
Tabela 04 – Médias para as variáveis de crescimento analisadas: massa fresca da planta (MFP), massa fresca da parte aérea (MFPA) e diâmetro da cabeça da alface (DCA) ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	75
Tabela 05 – Análise de variância para as variáveis de crescimento da cultura da alface crespa em função de lâminas de irrigação: massa fresca da planta (MFP), massa fresca da parte aérea (MFPA) e diâmetro da cabeça da alface (DCA) ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	76
Tabela 06 – Médias para as variáveis fisiológicas analisadas: soil plant analyses development index (SPAD), clorofila (CHL) e área foliar da amostra (AFA) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	78
Tabela 07 – Análise de variância para as variáveis fisiológicas da cultura da alface crespa em função de lâminas de irrigação: soil plant analyses development index (SPAD), clorofila (CHL) e área foliar da amostra (AFA) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	78
Tabela 08 – Médias para as variáveis de produção analisadas: massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca das folhas (MSF), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	80

Tabela 09 – Análise de variância para as variáveis de produção da cultura da alface crespa em função de lâminas de irrigação: massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca das folhas (MSF), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) de plantas de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	81
Tabela 10 – Médias para as variáveis analisadas: lâmina de irrigação, massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar da amostra (AFA), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) por planta de alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.) em função de lâminas de irrigação empregadas no primeiro e segundo ciclo. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	83
Tabela 11 – Consumo de água durante os ciclos de cultivo da alface ( <i>Lactuca sativa</i> L.). Nossa Senhora da Glória, SE. 2022.....	86
Tabela 12 – Investimento para aquisição do sistema de instrumentação agrícola para condução da irrigação na cultura da alface, na região do semiárido, município de Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFA	Área foliar da amostra
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANOVA	Análise de Variância
ARM	Armazenamento de Água Disponível
BH	Balanco Hídrico
BHC	Balanco Hídrico Climatológico
BHR	Balanco hídrico na zona radicular das plantas
CAD	Capacidade de Água Disponível no solo
CC	Capacidade de Campo
CHL	Clorofila
CI	Circuito Integrado
CRA	Curva de Retenção de Água no Solo
CRAN	Comprehensive R Archive Network
CUC	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen
DAS	Dias após sementeira
DAT	Dias após transplante
DC	Diâmetro do Caule
DCA	Diâmetro da cabeça da alface
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	Integrated Development Environment
IFAD	Fundo Internacional para o Desenvolvimento Agrícola
LL	Lâmina Líquida
MFP	Massa fresca da planta
MFPA	Massa fresca da parte aérea
MSC	Massa seca do caule
MSF	Massa seca das folhas
MSR	Massa seca da raiz
NF	Número de folhas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde

ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
RH	Umidade Relativa, do inglês, Relative Humidity
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Sistema de Controle Supervisório e Aquisição de Dados
SIC	Controlador Siplificado de Irrigação
SPAD	Soil Plant Analyses Development Index
TDR	Time Domain Reflectometer
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
TFSE	Terra Fina Seca em Estufa
TTL	Time to Live
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
VDC	Voltage Direct Current

## LISTA DE SÍMBOLOS

ha	hectare
m <sup>3</sup> /s	metro cúbico por segundo
%	Percentual
atm	atmosfera
ml	mililitro
ET <sub>0</sub>	Evapotranspiração de referência
K <sub>c</sub>	Coefficiente de cultivo
S	South
W	West
m	metro
mm	milímetro
AWG	American Wire Gauge
Mbps	Megabit por segundo
cm	centímetro
V	Volt
°C	grau Celsius
Mpa	Megapascal
k	Constante de calibração
f	Frequência
Hz	Hertz
Q	Vazão
L/min	Litro por minuto
t	tempo
s	segundo
V	volume
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
U <sub>p</sub>	umidade em peso;
U <sub>v</sub>	umidade em volume;
M	Massa
g	grama

$d_s$	densidade do solo.
$\text{g/cm}^3$	grama por centímetro cúbico
h	hora
rpm	rotação por minuto
$\mu\text{m}$	micrômetro
Kpa	Kilopascal
$\theta$	umidade volumétrica
$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$	metro cúbico por metro cúbico
$\psi_m$	potencial matricial
L	litro
$\text{Lh}^{-1}$	litro por hora
mca	metro de coluna d'água
ml/s	mililitro por segundo
L/h	litro por hora
q	vazão por emissor
$\bar{q}$	média das vazões
$\text{m}^2$	metro quadrado
$f_a$	coeficiente de disponibilidade da alface
$f_{tab}$	coeficiente de disponibilidade tabelado
ET <sub>c</sub>	evapotranspiração da cultura
$\text{mm.dia}^{-1}$	milímetro por dia
ET <sub>m</sub>	evapotranspiração máxima
R <sub>n</sub>	Saldo de Radiação ( $\text{MJ m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ )
G	Fluxo total diário de calor do solo
T	Temperatura média diária do ar
U <sub>2</sub>	Velocidade do vento média diária à altura de 2 m
e <sub>s</sub>	Pressão de saturação do vapor médio
e <sub>a</sub>	Pressão atual do vapor médio
(e <sub>s</sub> - e <sub>a</sub> )	Déficit de saturação de vapor médio diário
$\Delta$	Declividade da curva da pressão do vapor em relação à temperatura
$\gamma$	Coefficiente psicrométrico

$\text{MJ m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$	Megajoule por metro quadrado por dia
$\text{m.s}^{-1}$	metro por segundo
$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$	Kilopascal por grau celsius
Z	zona de profundidade do sistema radicular da cultura
$\text{ET}_r$	Evapotranspiração real da cultura
$\mu\text{g.cm}^{-2}$	micrograma por centímetro ao quadrado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Sustentabilidade e recursos hídricos.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Água na agricultura.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Agricultura familiar.....</b>	<b>30</b>
<b>3.4</b>	<b>Manejo de irrigação com o uso de métodos diretos e indiretos para medição de umidade do solo.....</b>	<b>32</b>
<b>3.5</b>	<b>Uso de instrumentos para o manejo da irrigação.....</b>	<b>33</b>
<b>3.6</b>	<b>Evapotranspiração.....</b>	<b>36</b>
<b>3.7</b>	<b>Balanco hídrico.....</b>	<b>37</b>
<b>3.8</b>	<b>Análise textural do solo.....</b>	<b>38</b>
<b>3.9</b>	<b>Curva de retenção de água do solo.....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Área de estudo.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Contextualização metodológica.....</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Montagem do sistema.....</b>	<b>42</b>
4.3.1	Sistema supervisorio SCADA.....	42
4.3.2	Protocolo Modbus RS-485.....	43
4.3.3	Microcontrolador arduino.....	45
4.3.4	Sensor de umidade do solo.....	45
4.3.5	Sensor de vazão/volume de água.....	46
<b>4.4</b>	<b>Caracterização do solo.....</b>	<b>49</b>
4.4.1	Análise textural do solo.....	49
4.4.2	Curva de retenção de água do solo.....	52
<b>4.5</b>	<b>Calibração do sensor de umidade do solo.....</b>	<b>55</b>
<b>4.6</b>	<b>Cultivo de alface sob lâminas de irrigação.....</b>	<b>56</b>
4.6.1	Condições climáticas.....	56
4.6.2	Manejo do solo.....	57

4.6.3	Tratamentos e delineamento experimental.....	59
4.6.4	Variáveis analisadas.....	64
<b>4.7</b>	<b>Análises estatísticas.....</b>	<b>65</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Montagem e funcionamento do sistema de monitoramento.....</b>	<b>67</b>
<b>5.2</b>	<b>Calibração dos sensores de umidade.....</b>	<b>70</b>
<b>5.3</b>	<b>Avaliação do cultivo de alface sob lâminas de irrigação.....</b>	<b>74</b>
5.3.1	Manejo das lâminas de irrigação.....	74
5.3.2	Primeiro ciclo: decisão da lâmina eficiente.....	75
5.3.3	Segundo ciclo: validação do sistema de monitoramento da umidade do solo.....	82
5.3.4	Estimativa do volume de água empregada.....	85
<b>5.4</b>	<b>Custo para implementação do sistema de monitoramento de umidade do solo.....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO A – Folha de dados do sensor de umidade do solo HD-38*.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO B – Folha de dados do sensor de vazão e volume.....</b>	<b>104</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura tende a ser desenvolvida, inicialmente, em regiões com chuvas distribuídas de modo espacial e temporal, em quantidades suficientes para atender às necessidades das culturas, entretanto, nas regiões de características físico-climáticas mais desfavoráveis, sobretudo nas áridas e semiáridas, como no Nordeste brasileiro, a irrigação torna-se imprescindível para o desenvolvimento da agricultura, principalmente no que concerne ao desenvolvimento das culturas agrícolas com a escassez contínua de água (ANA, 2021a).

A Agência Nacional de Águas (ANA), por meio de dados publicados em 2021 (ANA, 2021b), aponta que o total de água retirada<sup>1</sup> no Brasil, em 2020, foi de 2.831 m<sup>3</sup>/s, sendo a principal demanda para a irrigação, com um consumo de 50%, acompanhada pelo abastecimento urbano com 25% e industrial em torno de 9%. Juntos, representam aproximadamente 84% do consumo total e o restante (16%) se dá pela mineração, uso animal, termelétricas e abastecimento rural.

A previsão de demanda por água no Brasil tende a aumentar, sendo prevista uma retirada de 42% até 2040, conforme o relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021, da ANA. O relatório citado é referência para o acompanhamento sistemático dos recursos hídricos no país por meio de um conjunto de indicadores e estatísticas sobre a quantidade, a qualidade e os usos da água, bem como a sua gestão. Contudo, o aumento na demanda pode comprometer a segurança hídrica, que está relacionada à disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes, com o uso prioritário para o consumo humano e dessedentação animal.

Em 2018, por exemplo, cerca de 43 milhões de brasileiros foram atingidos por secas e estiagens, sendo 90% deles moradores da Região Nordeste e estima-se que 60,9 milhões de brasileiros vivam em cidades com risco hídrico, sendo necessários investimentos na ordem de R\$ 27,5 bilhões para garantir a segurança hídrica no Brasil até 2035 (ANA, 2019).

Ademais, deve-se considerar que a demanda pelo uso da água geralmente excede a sua disponibilidade natural, já que é um recurso limitado, sendo tal demanda cada dia maior em virtude do crescimento populacional e econômico, sobre a expectativa de um padrão de vida mais elevado (PIEDRA-MUÑOZ; GODOY-DURÁN; GIAGNOCAVO, 2017). Portanto, é

---

<sup>1</sup> Água retirada é o total de água captada para um uso; montante captado no corpo hídrico (ANA, 2019; 2020)

indispensável a otimização do uso da água, em especial na irrigação, pois é o componente do setor agrícola responsável pela maior proporção de consumo.

Sendo assim, se planejada e executada adequadamente, a irrigação potencializa a produção e a eficiência no uso da água, qualitativamente e quantitativamente, permitindo a diversidade de culturas, contribuindo para desenvolvimento da produção agropecuária e, conseqüentemente, do próprio Produto Interno Bruto (PIB) do país (FAO, 2017).

No Brasil, a partir do Censo Agropecuário de 2017, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi realizado um levantamento em mais de 5 milhões de propriedades rurais, onde foi diagnosticado que 77% dos estabelecimentos agrícolas foram classificados como sendo agricultura familiar ocupando uma área de 80,9 milhões de hectares, o que representa 23% da área total de estabelecimentos agropecuários no Brasil (IBGE, 2017a). Esta atividade promove o desenvolvimento rural com a geração de renda e emprego, contribuindo para a redução do êxodo rural e para a geração de capital, abastecendo o mercado interno e fomentando as estratégias de segurança alimentar do país (CONAB, 2017).

Eventualmente, a melhoria dos serviços ecossistêmicos e o desenvolvimento da dinâmica dimensional na agricultura familiar, impulsionados pelo uso de tecnologias, transferem benefícios para toda a sociedade, otimizando o uso dos recursos hídricos e favorecendo a agricultura familiar, associado a culturas que possam gerar retorno econômico satisfatório. Por exemplo, a cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) tem uma grande representatividade econômica e nutricional, pois corresponde à hortaliça de maior produção e consumo no Brasil. A qualidade e produtividade da alface estão relacionadas à alta necessidade hídrica, o que requer irrigações frequentes e abundantes, devido elevada evapotranspiração e sistema radicular pequeno e frágil (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 1996; SILVA, B. *et al.*, 2012; SOUZA, A., 2012).

De acordo com o Censo Agropecuário 2017 (IBGE, 2017a), dos 950.596 estabelecimentos agropecuários produtores de horticultura no Brasil, aproximadamente 33% (305.802) produzem a cultura da alface, um montante de 1.775.444 toneladas produzidas no país, sendo 864.851 toneladas produzidas pela agricultura familiar. Esses dados referem-se somente aos estabelecimentos produtores de horticultura e famílias enquadradas na agricultura familiar conforme o Decreto 9.064 de 31/05/2017 e cadastradas no Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF).

Cunha (2019) aponta que a ausência do manejo racional da irrigação advém da dificuldade dos agricultores na definição de quando e quanto de água aplicar no solo para o desenvolvimento da cultura, sugerindo, então, o uso de tecnologias que possam auxiliar na aplicação de água na hora certa e na exata quantidade de acordo com a necessidade hídrica da cultura.

A agricultura passa por diversas mudanças, demandando do agricultor um elevado nível de conhecimento (ANTONINI *et al.*, 2018). Os agricultores, além de administradores, devem estar atentos às informações provenientes do campo, para contribuição na aplicação de novas técnicas e tomadas de decisões. É necessária a interação das informações sobre os dados de produção com a cultura e sobre como eles podem ser maximizados, a exemplo do uso da água, evitando possíveis danos econômicos e ambientais.

Assim, ao utilizar um equipamento que auxilie no manejo da irrigação e contribua com o desenvolvimento da agricultura, contemplará a Agenda 2030, documento adotado na Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, apresentando os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que têm como propósito, segundo a ONU (2021), promover ações mundiais, para extinguir a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade.

A hipótese estabelecida é que ao utilizar as informações dos sensores de umidade do solo, vazão/volume de água para irrigar a alface, haverá um consumo eficiente de água evitando aplicar uma lâmina excessiva ou menor do que a adequada, garantindo a produtividade de maneira conjunta aos pilares da sustentabilidade, seguindo o marco ordenador proposto pela ONU nas dimensões ambiental<sup>2</sup>, social<sup>3</sup>, econômica<sup>4</sup> e institucional<sup>5</sup>, estabelecendo uma relação harmoniosa do homem com a natureza.

Portanto, a inserção de um sistema que monitore a umidade do solo e equipamentos que possam gerar informações com acurácia e de baixo custo, auxiliarão a agricultura familiar a

---

<sup>2</sup> A dimensão ambiental trata dos fatores de pressão e impacto, e está relacionada aos objetivos de preservação e conservação do meio ambiente, considerados fundamentais a qualidade de vida das gerações atuais e em benefício das gerações futuras. (IBGE, 2017b).

<sup>3</sup> A dimensão social corresponde, especialmente, aos objetivos ligados à satisfação das necessidades humanas, a melhoria da qualidade de vida e a justiça social. (IBGE, 2017b).

<sup>4</sup> A dimensão econômica trata de questões relacionadas ao uso e esgotamento dos recursos naturais, da produção e gerenciamento de resíduos, uso de energia, e o desempenho macroeconômico e financeiro do País. É a dimensão que se ocupa da eficiência dos processos produtivos e das alterações nas estruturas de consumo orientadas a uma reprodução econômica sustentável de longo prazo. (IBGE, 2017b).

<sup>5</sup> A dimensão institucional diz respeito à orientação política, capacidade e esforço despendido por governos e pela sociedade na implementação das mudanças requeridas para uma efetiva implementação do desenvolvimento sustentável. (IBGE, 2017b).

desempenhar um papel socioeconômico e cultural, buscando fortalecer nos dias atuais a interação do homem com o meio ambiente, adequando-a a um modelo sustentável, com a aplicação de tecnologia disruptiva no manejo da irrigação.

Este trabalho tem como objetivo geral empregar microcontroladores associados a sensores de umidade do solo, vazão e volume de água, para o manejo da irrigação na cultura da alface como ferramenta de suporte à otimização do uso da água irrigada na agricultura familiar.

Assim, o texto está dividido nos seguintes tópicos: primeiro são apresentados os objetivos da pesquisa. Em seguida, é apresentada a fundamentação teórica, que serve de base para as discussões temáticas abordadas na pesquisa, tais como água na agricultura, agricultura familiar, manejo de irrigação com métodos diretos e indiretos para medição da umidade do solo, o uso de instrumentos para o manejo da irrigação, além de temas como evapotranspiração, balanço hídrico, análise textural do solo e curva de retenção de água no solo.

Na sequência, são apresentados os métodos e técnicas da pesquisa, subdividido em 4 partes: a primeira apresenta a delimitação e caracterização da área de estudo, o recorte geográfico em que está inserido o município de Nossa Senhora da Glória. Na segunda parte, são abordadas as características dos componentes do sistema para monitoramento da umidade do solo. Na terceira parte, são apresentados os métodos e técnicas utilizados para conhecer as características do solo, para subsidiar a calibração dos sensores de umidade. Na quarta parte, são abordados os métodos e técnicas utilizados para avaliar os efeitos do manejo da irrigação nos aspectos agronômicos, com o uso do sistema desenvolvido.

Em seguida, são apresentados os resultados e discussões, utilizando tabelas e gráficos, acompanhados das análises estatísticas. Inicialmente, é apresentado o funcionamento do sistema de monitoramento, em seguida, os dados de calibração dos sensores de umidade e por fim, os dados agronômicos da alface a partir das lâminas de irrigação empregadas e validação do sistema. Por fim, são feitas algumas considerações finais a partir dos resultados encontrados.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Empregar microcontroladores associados a sensores de umidade do solo, volume /vazão de água, para o manejo da irrigação na cultura da alface no município de Nossa Senhora da Glória, região de clima semiárido, no Estado de Sergipe, como ferramenta de suporte à otimização do uso da água irrigada na agricultura familiar.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver um sistema de monitoramento das variáveis umidade do solo e vazão/volume aplicados a um sistema de irrigação, por meio de sensores, com o protocolo de comunicação ModBus© com a camada física RS-485;
- Calibrar um sensor de umidade do solo para uso em sistema de monitoramento de irrigação, a partir da caracterização do solo;
- Avaliar o sistema de monitoramento das condições hídricas do solo por meio de experimentação em área de produção de alface sob lâminas de irrigação.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Sustentabilidade e recursos hídricos**

O termo desenvolvimento sustentável, considerado desafio do século XXI por Sachs (2008) e Veiga (2008), foi apresentado mundialmente na Assembleia Geral das Nações Unidas pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1987, fundamentado pela relação harmoniosa dos objetivos sociais, ambientais e econômicos, definiu-se como: “é aquele que atende as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991, pg.46). Porém, segundo Sachs (2008), para atingir a plenitude do desenvolvimento sustentável é necessário atender às oito dimensões da sustentabilidade – ambiental, econômica, social, cultural, espacial, psicológica e política nacional e internacional. Faccioli e Gomes Filho (2021) relacionaram as dimensões da sustentabilidade com as questões do desenvolvimento sustentável nas dimensões ecológica, econômica, social, espacial, cultural, tecnológica, e políticas nacional e internacional. A dimensão ecológica diz respeito ao manejo sustentável integrado à gestão dos recursos hídricos, de maneira que o desenvolvimento atenda ao bem comum do meio ambiente e das gerações futuras. A dimensão econômica atua no sentido que a cadeia produtiva favoreça melhorias nas condições de vida da sociedade e o meio ambiente. Já a dimensão social compreende as políticas públicas e de incentivo da iniciativa privada, para atender as necessidades básicas essenciais da sociedade, de modo a reduzir as desigualdades sociais. A dimensão espacial envolve a introdução de investimentos em infraestrutura, atividades econômicas e de necessidade básica para as populações de zonas rurais e o fomento de empreendimentos que absorvam a cadeia produtiva local. A dimensão cultural visa garantir a preservação das tradições culturais locais, mantendo a herança para as gerações futuras, promovendo a cidadania. A dimensão tecnológica promove o desenvolvimento científico e tecnológico local, fomentado por parcerias público-privadas e investe na capacitação da mão de obra local. Enquanto a dimensão das políticas nacional e internacional tem o objetivo de garantir a participação efetiva de toda a comunidade no desenvolvimento das políticas públicas, estabelecer a transparência pública, principalmente nos fatores econômicos e sociais, incentivar a comunidade na participação de projetos de desenvolvimento sustentável, além da manutenção das contas públicas, e abster-se de práticas distorcidas sobre o conceito de governabilidade.

Sendo assim, percebe-se a necessidade de atuar constantemente na busca por mecanismos que favoreçam o desenvolvimento sustentável, inclusive no uso consciente dos recursos hídricos, pois, segundo projeções da FAO (2012), estima-se que será necessário elevar até 2050 a produção de alimentos e água em 70% e 40%, respectivamente, sendo que até lá, mais de 50% dos alimentos serão produzidos a partir de sistemas irrigados. É necessário o planejamento, principalmente com políticas públicas que possam garantir a produção de alimentos, juntamente com o uso eficiente dos recursos hídricos de maneira sustentável. Garantindo, desta maneira, um retorno econômico, de modo a evitar a degradação de novas áreas nativas, imprescindível para a preservação da biodiversidade e dos recursos naturais e, conseqüentemente, solucionar os desafios globais como as mudanças climáticas e a garantia de segurança alimentar, podendo ainda ser pormenorizadas com a agricultura irrigada.

### **3.2 Água na agricultura**

A agricultura irrigada é o maior uso da água no Brasil e no mundo. A atividade foi intensificada no nosso país a partir das décadas de 1970 e 1980, favorecida principalmente, pela expansão da agricultura em regiões de clima desfavorável, políticas públicas de incentivos regionais e a disponibilidade de financiamentos (ANA, 2019). Ainda segundo o manual de usos consuntivos<sup>6</sup> da água no Brasil:

O Brasil é um país privilegiado quanto à disponibilidade hídrica total, no entanto a ocorrência da água é desigual no território e durante o ano, bem como a demanda por sua utilização e a infraestrutura hídrica adequada para o seu aproveitamento e conservação. A cultura da abundância hídrica tem sido progressivamente substituída pela ideia da água como bem finito e dotado de valor econômico, tornando as análises do balanço entre usos e oferta hídrica cada vez mais importantes, ao revelar regiões de déficits de acesso à água e risco aos setores produtivos (ANA, 2019, p. 7).

O uso da água para a agricultura irrigada superou o abastecimento urbano em quase todas as regiões do Brasil, com exceção da região Norte e, a Sudeste, com projeções a partir de 2020. No Nordeste a agricultura irrigada supera o abastecimento urbano, a partir da segunda década de 1990 (ANA, 2019).

Desta maneira, o uso da água contribui para a segurança alimentar, um assunto que vem sendo debatido por diversos órgãos internacionais, principalmente sobre o seu uso na

---

<sup>6</sup> “Um uso é considerado consuntivo quando a água retirada é consumida, parcial ou totalmente, no processo a que se destina, não retornando diretamente ao corpo d’água. O consumo pode ocorrer por evaporação, transpiração, incorporação em produtos, consumo por seres vivos, dentre outros” (ANA, 2019, p. 9).

agricultura. Além, do crescimento da densidade demográfica, inclusive em países desenvolvidos, há aumento da demanda por alimentos e biocombustíveis, vindo a ocasionar maior pressão ao meio ambiente, aos mananciais utilizados para a irrigação e para o consumo animal e humano (FAO, 2017).

Consequentemente, o aumento da irrigação contribui, em geral, para o uso intensivo da água. Desta maneira, os aportes neste setor resultam, também, um crescimento considerável na produtividade e reduz a pressão pela incorporação de novas áreas para cultivo (ANA, 2021b).

A deficiência hídrica para a cultura pode reduzir a produção, assim como o excesso de água pode ser prejudicial, pois a saturação do solo impede a aeração, contribuindo com a perda de nutrientes e a salinização, devido à elevação do lençol freático, além de outros danos, como o desenvolvimento de fungos no solo e na cultura, inibindo o seu desenvolvimento; o desperdício de fertilizantes, aumentando o custo da produção e contaminando as águas subterrâneas (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2007).

Para otimizar o uso da água na agricultura, muitos pesquisadores buscam melhorias para o manejo da irrigação. Nesse contexto, o uso de equipamentos que indicam e monitoram o teor de água no solo vem contribuindo, pois permitem identificar a condição hídrica, para que possa ser atendida a necessidade de água da cultura (GOMES, E. *et al.*, 2017).

Na busca por melhorias da irrigação, a eficiência no uso da água pode ser alcançada por meio do monitoramento da umidade do solo, como uma técnica importante para a agricultura (SOUZA, C. *et al.*, 2013). O controle do teor de água no solo pode contribuir para que o agricultor realize o manejo da irrigação adequada e responsavelmente, pois permite a tomada de decisão sobre quando e quanto irrigar, otimizando a produção da cultura e o manejo racional da água, evitando o escoamento e a percolação, reduzindo, assim, impactos ambientais (KINZLI; MANANA; OAD, 2012).

Todavia, a introdução do monitoramento da umidade do solo ou o controle da demanda hídrica por meio da evapotranspiração das plantas, demanda investimento em tecnologias e conhecimentos, o que é mais restritivo quando se menciona a agricultura familiar que, conforme Marques e Teixeira (2019), “a adoção por equipamentos mais eficientes e infraestruturas de reserva hídrica podem estar excluindo e comprometendo grupos mais fragilizados, como a agricultura familiar, principalmente pelas limitações financeiras e de capacitação geralmente associadas a estes” (p.63).

O uso de tecnologias voltadas para a irrigação, então, deve enquadrar a agricultura familiar, difundindo o seu uso e levando em consideração, sobretudo, os custos de aquisição, implantação e facilidade de manuseio, com o apoio principalmente de políticas de fortalecimento rural, com alcance igualitário a qualquer tipo de agricultor, inclusive na agricultura familiar.

Contudo, a importância em manter a agricultura irrigada sustentável, visando intensificar a produção sem a necessidade de ampliação da área de produção (DOURADO NETO; PAOLINELLI; MANTOVANI, 2021), ou seja, o uso eficiente dos recursos hídricos conforme Alves e Augusto (2021) está diretamente ligado a racionalidade e produtividade, referindo-se como o ato de produzir corretamente, sem consumo excessivo do recurso disponível. Torna-se importante o uso consciente do recurso hídrico, principalmente na irrigação, considerando ser um recurso finito e com a necessidade de atender a demanda, a partir do crescimento e desenvolvimento populacional das gerações futuras.

### **3.3 Agricultura familiar**

Conforme a Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006, são classificados em agricultores familiares aqueles que exercem atividade no meio rural, utilizando predominantemente mão-de-obra da própria família nas atividades econômicas do seu estabelecimento ou empreendimento, e desenvolvem suas atividades com princípios voltados para a sustentabilidade ambiental, social e econômica (BRASIL, 2006).

A maioria dos pequenos agricultores tem sua renda proveniente da produção desenvolvida na propriedade, para tanto, é a partir dos membros da família que surge a força de trabalho, responsáveis pelo gerenciamento e desenvolvimento da atividade produtiva na propriedade, características da agricultura familiar (FAO, 2014; BAGGIO; KUHL, 2018).

Segundo Perez, Gonzalez e Muñoz (2015), a agricultura familiar possui 5 (cinco) dimensões: (a) a social, que promove a soberania, segurança alimentar, saúde física e social; (b) a tecnológica, que desenvolve tecnologias e maquinários locais de baixo custo, reduz a relevância e dependência de tecnologias convencionais externas, o uso de instrumentos e equipamentos adaptados aos usos e costumes locais; (c) a ambiental, regulando os serviços ecossistêmicos, como polinização e regulação natural de pragas, fertilidade natural, além da melhoria das condições de enfrentamento às mudanças climáticas e sua mitigação; (d) a econômica e energética, com o aumento da eficiência energética dos agroecossistemas e

diminuição dos custos ocultos; (e) e cultural, relativa a identidade e sentimento de pertencimento, prazer estético, satisfação espiritual e valor pedagógico induzindo comportamentos cooperativos, solidariedade e amor em seu sentido mais amplo. Os autores finalizam ao afirmar que o resultado da agricultura familiar é a melhoria dos serviços ecossistêmicos, levando maiores benefícios para a sociedade.

Com o objetivo de interligar as dimensões econômica, social e ambiental na agricultura familiar – incluindo os grupos de pescadores, silvicultores, indígenas e outros produtores de alimentos – a ©FAO e IFAD<sup>7</sup> (2019), com o seu Plano de Ação Global da Década da Agricultura Familiar das Nações Unidas (2019-2028), reconhecem esses grupos como os maiores investidores na agricultura e produtores de alimentos no mundo e, simultaneamente, cumprem funções ambientais, sociais e culturais, preservando todo o ecossistema. Enfatizam que a agricultura familiar, quando apoiada em políticas e programas afirmativos, consolidam o seu protagonismo na produção de alimentos e na redução das desigualdades sociais.

Diante do protagonismo da Agricultura Familiar no abastecimento à população, é importante o reconhecimento do seu papel desempenhado perante a sociedade, e ressaltar uma cultura sustentável no manejo racional da irrigação, pois, conforme Cunha (2019, p. 21), “todo o processo de cultivo é realizado a partir da vivência e tradição familiar dos agricultores, que usam conhecimentos do senso comum para melhor produzir, e sem consciência dos danos causados ao meio ambiente em função da falta de informação científica”.

Taveira *et al.* (2019) afirmam que as pesquisas científicas e as políticas públicas para a agricultura familiar estão se difundindo, porém, existe a necessidade de conhecimento mais profundo sobre as suas características para a condução de alternativas que desencadeiem soluções para o desenvolvimento da sua comunidade, para a manutenção cultural e superação da pobreza.

Vislumbram-se iniciativas que reconheçam a importância da agricultura familiar e o seu enfrentamento a uma crescente pressão no fornecimento de alimentos em larga escala, livre de agrotóxicos, com baixo custo, e possam lidar com as mudanças climáticas, perda de biodiversidade, degradação do solo e escassez de água, que sem o apoio de políticas públicas com ampla abrangência, e sem a informação necessária aos atores, dificultam o alcance de metas para o desenvolvimento sustentável.

---

<sup>7</sup> IFAD - Fundo Internacional para o Desenvolvimento Agrícola.

### 3.4 Manejo de irrigação com o uso de métodos diretos e indiretos para medição de umidade do solo

O volume de água armazenado no solo influencia a sua umidade, alterando a resistência e a compactação, entre outros fatores. Portanto, é indispensável conhecer a umidade do solo para compreender o movimento da água, a disponibilidade de água, erosão, época e quantidade a ser aplicada em irrigação (BERNARDO *et al.*, 2019). Segundo Braga *et al.* (2018), com o passar do tempo percebeu-se a necessidade de desenvolver metodologias e equipamentos para a determinação da umidade do solo, variando a sua precisão, o custo e a praticidade.

Bernardo *et al.* (2019) apresentam metodologias para cálculo de umidade do solo e descrevem o método de *Bouyoucos*, de *Colman*, os tensiômetros, sondas de nêutrons e Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

O método de *Bouyoucos* é baseado na resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos comumente em um bloco de gesso (BOUYOUCOS, 1926). Este autor destaca que o medidor pode ser empregado satisfatoriamente no manejo da irrigação, mas para pesquisas que envolvem o teor de água no solo, deve-se desprezar a sua calibragem geral em porcentagem de “água disponível” e calibrá-lo em função da porcentagem de umidade de cada tipo de solo.

Semelhante ao método de *Bouyoucos*, Bernardo *et al.* (2019) descrevem que o método de *Colman* se baseia no mesmo princípio de funcionamento, ou seja, na variação da resistência elétrica, porém, os eletrodos estão inseridos em um material de fibra de vidro, envolvidos por placas de metal “monel”, e com a vantagem de possuir um termistor, que realiza as correções da leitura em função da temperatura.

Os tensiômetros, como método indireto para determinar o teor de água no solo, se constituem uma cápsula de cerâmica ligado por meio de um tubo em um manômetro, geralmente do tipo bourdon, limitado a leituras de até 0,75 atm e cobrindo somente uma parte da água disponível no solo, em torno de 70% em solo arenoso e 40% em argilosos.

As sondas de nêutrons medem a umidade volumétrica com precisão, porém, possui um alto custo de aquisição e requer cuidados específicos na sua operação, por possuir elementos radioativos na composição do equipamento.

Frequentemente utilizado, o método de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), cuja base de medição está relacionada com a capacitância de um meio isolador e o espaço livre, a partir do envio de pulsos elétricos provenientes de um gerador de pulsos, emitindo-os até o

solo por meio de uma sonda, em que o reflexo desse pulso retorna para o equipamento, assim, gera a constante dielétrica do meio que está relacionada à umidade do solo (BERNARDO *et al.*, 2019).

Outro método também frequentemente utilizado, em que a medição está relacionada a capacitância, e baseia-se na constante dielétrica do solo (K) é a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR). Destaca-se por sua precisão, segurança na operação e rapidez na obtenção do teor de água no solo (SOUZA *et al.*, 2016). Na atualidade, o principal fabricante de sondas por capacitância é a empresa australiana Sentek<sup>®</sup>.

### **3.5 Uso de instrumentos para o manejo da irrigação**

Práticas em algumas regiões do Brasil têm buscado a inserção de tecnologias que auxiliem na agricultura. Por exemplo, uma pesquisa foi realizada por Soares Filho e Cunha (2015), no sudoeste de Goiás, sobre a utilização de tecnologias, aplicando questionários a produtores que utilizavam alguma forma de agricultura de precisão, e os problemas enfrentados com o seu uso. Obteve-se que as tecnologias mais utilizadas são a amostragem do solo em grade e adubação a lanço, sendo que o uso de sensores para a irrigação ainda está ausente, identificando como principais obstáculos a carência de mão de obra especializada e o custo para a aquisição dos equipamentos.

Com a aplicação de um controlador lógico programável como ferramenta de suporte ao manejo da irrigação na cultura do coco, Carvalho (2011) obteve um maior consumo de água, porém, proporcionou uma maior produtividade e rentabilidade da cultura. Ainda, com a finalidade de realizar o manejo da irrigação, Giacomelli (2011) automatizou a irrigação da cultura da alface a partir das condições climáticas locais, o que favoreceu a melhoria dos aspectos agronômicos e na redução do consumo de energia elétrica e dos recursos hídricos, quando comparados ao manejo realizado pelos produtores locais.

A aplicação de instrumentos na agricultura surge como ferramenta de apoio nas atividades do campo, sendo que alguns equipamentos realizam atividades sem a intervenção humana, como exemplo a irrigação das culturas. Para um eficiente manejo da irrigação, Cunha (2019) buscou avaliar o uso de microcontroladores para a tomada de decisão no processo de irrigação de hortaliças, visando a economia dos recursos hídricos e de energia elétrica,

resultando em uma pequena estação meteorológica de baixo custo, irrigando a cultura automaticamente.

Rocha *et al.* (2014) contribuíram com os estudos sobre a irrigação de precisão, desenvolvendo um sistema para controle e monitoramento das variáveis de temperatura, umidade do solo e luminosidade, integrado a um banco de dados, acessado através da internet, podendo ser operado facilmente pelo agricultor na automação da irrigação. Os autores afirmaram ser prático e econômico, de emprego simples, baixo custo, podendo ser implantado em pequenas, médias e grandes lavouras.

Santos, L. *et al.*, (2020), com auxílio de um aplicativo móvel baseado nos dados coletados em lisímetros e pluviômetro, para monitorar o consumo de água das culturas e informar o tempo de irrigação equivalente, a partir da evapotranspiração da cultura (ETc). Esse autores obtiveram respostas significativas aos testes com a aplicação desta ferramenta funcional permitindo que o agricultor obtenha no aplicativo o consumo diário de água pela cultura, bem como a sua demanda hídrica.

O baixo custo na aquisição de instrumentos para o manejo da irrigação vem sendo popularizado, permitindo sua aplicação na agricultura familiar, que a depender do sistema de irrigação adotado, alguns requerem um elevado nível de conhecimento pelo produtor.

Gonçalves *et al.* (2014) compararam o manejo da irrigação de um sistema automático de baixo custo, com o sistema Irrigás e tanque Classe A, na cultura da alface, avaliando os resultados das características da cultura e dos métodos de irrigação. Baseados nos resultados obtidos, os autores chegaram à conclusão que existe diferença no modo de operação dos sistemas e o custo, porém os resultados obtidos na produção da cultura e aplicação de lâminas de água são próximos aos recomendados pela literatura, ficando como ressalva que o método a ser escolhido dependerá do nível de conhecimento do agricultor.

A determinação do momento para irrigar é crucial para o desenvolvimento de culturas, principalmente as hortaliças, a exemplo da Alface. Ao realizar teste de um dispositivo denominado Controlador Simplificado de Irrigação (SIC), com sensores medindo a tensão de água para a irrigação de mudas da alface automaticamente, Bezerra *et al.* (2019) constataram um melhor aproveitamento com o sensor posicionado na atmosfera em relação ao sensor posicionado no solo.

A aplicação de sensores para determinar o momento de irrigar a cultura vem sendo introduzido no manejo da agricultura e tem apresentado resultados que permitem conhecer a

maneira mais eficiente de aplicar, tornando o seu uso cada vez mais prático. Para garantir o nível de confiabilidade das informações coletadas pelos sensores aplicados no manejo da irrigação, existe a necessidade da calibração<sup>8</sup> dos mesmos e a parametrização com os métodos que determinam as variáveis empregadas.

Desta forma, Antunes Junior, Alves Junior e Casaroli (2018) calibraram um sensor de umidade do solo capacitivo em diferentes densidades em solo do tipo Latossolo Vermelho distrófico. Os resultados apontaram que a calibração do sensor de umidade do solo estimou com acurácia o teor de água para o solo estudado. Apesar de alguns sensores serem vendidos calibrados, existe a necessidade de ajustes de acordo com o método a ser aplicado.

Dentre as tecnologias mencionadas, o sensor de umidade do solo tem se tornando um instrumento eficiente para determinação do teor de água no solo, em especial quando calibrado corretamente. Almeida *et al.* (2018) calibraram uma sonda TDR e avaliaram o desempenho de modelos para determinação da umidade do solo, em um Argissolo Amarelo, coletando amostras deformadas e indeformadas. Como resultado, os valores de umidade do solo conforme os modelos empregados, apresentaram baixos erros na estimativa, sendo melhor indicado para amostras indeformadas com aplicação em laboratório.

Silva, B. *et al.* (2012) calibraram e determinaram a acurácia de uma sonda multisensor capacitivo para determinação de teor da água no solo, em diferentes profundidades e solos específicos, para medições em tempo real. Demonstraram que a calibração de fábrica não foi adequada, sendo que das calibrações realizadas, constataram que era necessário somente duas equações para avaliar a acurácia do teor de água no solo. A calibração dos sensores é tão importante quanto o tratamento dos dados, para uma garantia do nível de confiabilidade das informações coletadas.

Conforme abordado por Silva, B. *et al.* (2012), a introdução de instrumentos na agricultura tem sido pesquisada constantemente, buscando estabelecer dados com elevado nível de confiança, a busca por tecnologias de baixo custo e fácil aplicação e/ou uso, não excluindo a inserção da agricultura familiar na aquisição e emprego dos instrumentos no manejo da agricultura. Além da importância do conhecimento do teor de água no solo para um manejo da

---

<sup>8</sup> Calibração - “Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação” (INMETRO, 2012, p. 41).

irrigação sustentável, garantindo a responsabilidade socioambiental e econômica, na produção de alimentos.

### 3.6 Evapotranspiração

A chuva é o principal fenômeno responsável pela entrada da água no ciclo hidrológico, retornando à atmosfera através do efeito da evapotranspiração (ANA, 2021a). A evapotranspiração compreende a evaporação na superfície do solo e a transpiração das plantas, fatores que contribuem para o desenvolvimento das culturas. Os principais fatores que influenciam a evapotranspiração são as variações climáticas ( $ET_0$ ) e as características do cultivo ( $ET_c$ ) como o tipo, a variedade e o estágio de desenvolvimento da cultura (ALLEN *et al.*, 1998). Esses fatores, conjuntamente com o manejo do solo, contribuem para a estimativa de água da chuva que a cultura consegue absorver, podendo utilizar-se da irrigação para suplementar a demanda hídrica do cultivo (ANA, 2021a).

Para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), correspondente a um hipotético cultivo de pastagens com características específicas, o método padrão recomendado pela FAO-56 é o de Penman-Monteith, podendo ser calculado para diferentes períodos que vão desde horário, diário e mensais, a depender da exatidão requerida. Para calcular a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), necessário para determinar as necessidades hídricas, multiplica-se a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) por um coeficiente da cultura ( $K_c$ ), que variam de acordo com as condições climáticas predominantes e características do cultivo (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

A relação  $ET_c/ET_0$  podem ser determinadas experimentalmente para as diversas culturas, resultando em valores distintos de  $K_c$ , a partir de características como a altura, albedo, resistência do cultivo e a evaporação que ocorre no solo (ALLEN *et al.*, 1998). A determinação do coeficiente  $K_c$  é primordial para a determinação da necessidade hídrica das culturas, inerente às condições edafoclimáticas de cada local (SILVA; TAVARES; SOUSA, 2013). O coeficiente do cultivo pode ser único, em que os efeitos de transpiração e evaporação são combinados, empregado para estimar a  $ET_c$  por períodos de tempos semanais ou superiores, e o coeficiente dual em que os efeitos são determinados separadamente, o coeficiente basal do cultivo ( $K_{cb}$ ) para descrever a transpiração e o coeficiente de evaporação de água no solo ( $K_e$ ) para descrever a evaporação da água que ocorre na superfície do solo, ambos recomendados para acompanhar os valores diários da  $ET_c$  (ALLEN *et al.*, 1998). Os coeficientes único e dual são aplicados para

culturas sob condições padrão, livres de pragas e sob ótimas condições climatológicas e de umidade do solo.

Segundo Ferreira *et al.* (2018), a estimativa da  $ET_0$  é um fator importante para estudos hidrológicos e gestão de sistemas de irrigação e planejamento agrícola. A aplicação eficiente de água nas culturas com precisão na identificação da frequência e do volume da irrigação para que não haja excesso ou escassez de água na cultura, além de envolver equipamentos modernos para um manejo adequado, torna-se indispensável a obtenção de informações das condições hídricas do solo e da evapotranspiração da cultura (PAVÃO; SIMIONE; SOUZA, 2017).

Desta maneira, a partir do cálculo da  $ET_0$ , é possível otimizar o uso da água na irrigação, inclusive em regiões áridas e semiáridas, baseado no monitoramento das informações climáticas (TELES *et al.*, 2018). Estes autores realizaram o manejo da irrigação da alface em canteiros convencionais no semiárido de Pernambuco, por meio da evapotranspiração de referência diária estimada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), e concluíram que ao usar o método baseado na  $ET_0$  houve um menor consumo de água em comparação ao sistema de irrigação proposto, o cuca de umbu.

Portanto, conhecer a  $ET_0$  de uma região contribui para o desenvolvimento das culturas, principalmente nas regiões semiáridas do Brasil, devido ao baixo índice pluviométrico, onde a demanda hídrica é suplementada com a irrigação, de maneira a repor parcial ou totalmente o que evaporou do solo e transpirou da superfície vegetal, com o objetivo de atender a taxa de evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ).

### **3.7 Balanço hídrico**

O balanço hídrico climatológico (BHC) foi desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) para determinar o regime hídrico de uma região como um método indireto de medidas das condições do solo. Para o cálculo é necessário definir o armazenamento máximo da Capacidade de Água Disponível no solo (CAD), a precipitação e a evapotranspiração potencial no período, permitindo verificar a evapotranspiração real, a deficiência ou o excedente hídrico, e o total de água retida no solo para o período estimado (PEREIRA, 2005).

Os métodos mais comuns para o manejo da irrigação são fundamentados no turno de rega, no balanço hídrico (BH) do solo e no potencial de água do solo, sendo que o método de manejo que se baseia no balanço hídrico do solo prioriza as entradas de água, através da

irrigação e da precipitação, e as saídas de água, pela evapotranspiração (RODRIGUES; SOUSA, 2018).

### **3.8 Análise textural do solo**

A textura do solo é convenientemente quantificada em termos de teor de areia, argila e silte, de forma a perfazer um total de 100%, sendo necessário somente o percentual de areia e argila para especificar a textura, tendo a densidade do solo como um fator contribuinte (DEXTER, 2004).

Guimarães *et al.* (2010) calibraram sensores de umidade do solo, no campo e no laboratório, e fizeram uma relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial denominando como curva de retenção ou curva característica, frisando que essa relação não é universal, depende de características do solo local, como a densidade e textura do solo.

Gava, Silva, Baio (2016) e Sena *et al.* (2020) realizaram a análise textural do solo para calibrar sensores de umidade, justificando a necessidade de acordo com as características do solo local.

### **3.9 Curva de retenção de água do solo**

A relação entre o teor de água do solo e a sua tensão potencial é a parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo. Esta relação inclui, principalmente, a função de retenção de água, a característica da umidade e a curva de pressão de saturação por capilaridade (KLUTE, 1986).

A curva de retenção da água no solo depende principalmente da textura ou distribuição do tamanho de partículas do solo e a estrutura do seu arranjo (SALTER; WILLIAMS, 1965). A matéria orgânica é um outro fator que, segundo Klute (1986), influencia na retenção devido à sua natureza hidrofílica, modificando a estrutura do solo.

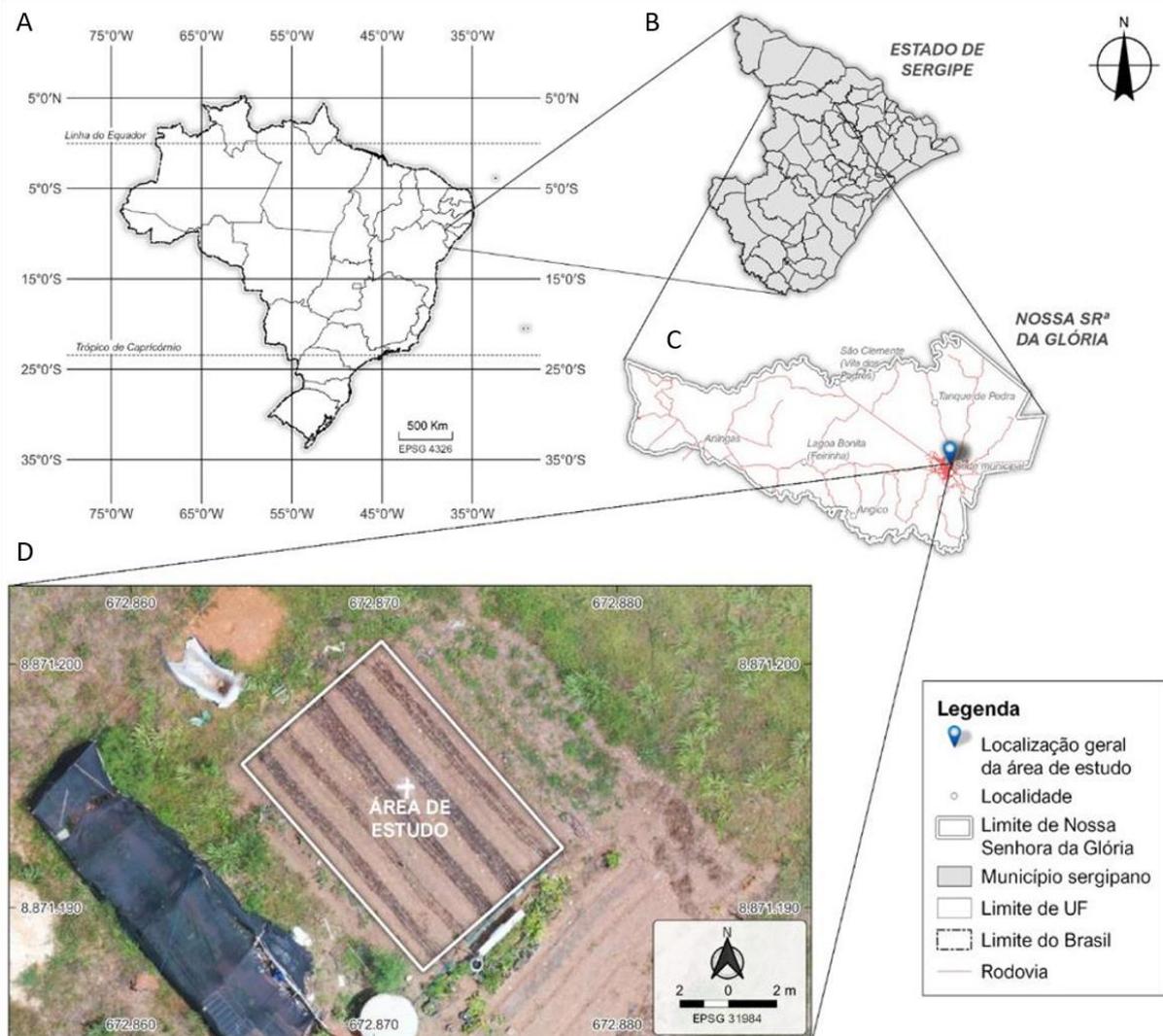
Gomes, F. *et al.* (2017) obtiveram a curva característica de água no solo, e ajustaram ao conteúdo de água no solo ao modelo matemático de Van Genuchten (1980), comparando os desvios aos obtidos a partir da calibração de sensores de umidade do solo. Antunes Junior, Alves Junior e Casaroli (2018) utilizaram a curva de retenção a partir do modelo matemático de Van Genuchten (1980) para a calibração de sensores de umidade em diferentes densidades do solo.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

O experimento foi realizado na área pertencente à agricultora Maria José de Jesus Oliveira, conhecida popularmente como Maria da Horta, que trabalha com a agricultura familiar e orgânica, principalmente na produção de hortaliças, localizada no município de Nossa Senhora da Glória (SE), de área total equivalente a 0,16 ha, sob coordenadas geográficas: latitude  $-10^{\circ}11'27.0''S$ , longitude  $-37^{\circ}27'23.1''W$  e altitude 294m (Figura 01).

Figura 01 – Ilustrações da localização da área do experimento. A) Mapa do Brasil, com destaque ao estado de Sergipe; B) Mapa de Sergipe com destaque ao município de Nossa Senhora da Glória (SE); C) Mapa de Nossa Senhora da Glória com destaque a área experimental; D) Imagem aérea da área do experimento.

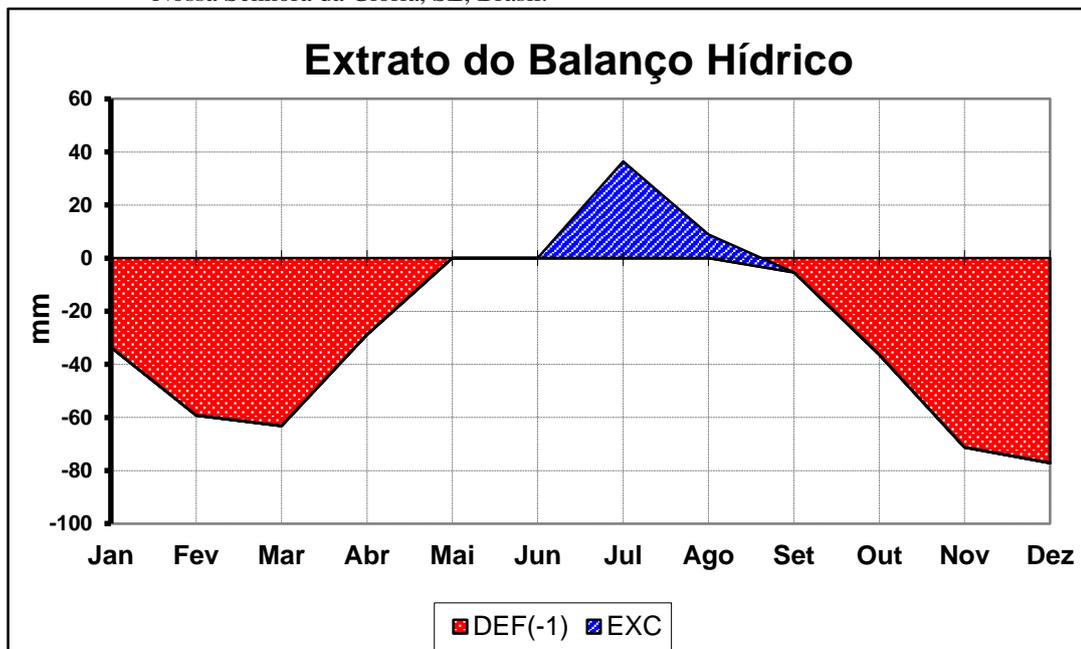


Fonte: Raimundo R. Melo Neto e GESI – Grupo de Estudos em Salinidade e Irrigação, 2022.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo As, ou seja, tropical com verão seco (SOUSA; BRITO, 2022), também considerado clima do tipo semiárido (IBGE, 2002; BRASIL, 2017), com média anual de pluviosidade de 711,3 mm, estando concentrada nos meses de abril a julho, sendo que a distribuição é bastante irregular temporal e espacialmente (ALVARES *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2014).

A representação do Balanço Hídrico Climatológico (BHC) para o município de N. Sra. da Glória-SE, foi elaborada a partir do método proposto por Thornthwaite e Matter (1955), por meio do programa “BHnorm”, com uso de planilha Excel, por Rolim, Sentelhas e Barbieri (1998), para o nível de armazenamento de água no solo de 100 mm. De acordo com os resultados obtidos, observou-se o excedente hídrico entre os meses de maio a agosto, período em que também ocorre o armazenamento de água no solo. Em setembro inicia o processo de retirada de água do solo, resultando na ocorrência de deficiência hídrica, compreendida entre os meses de setembro e abril (Figura 02). Fica evidente a necessidade de irrigação plena e suplementar no município, pois a região enfrenta oito meses de deficiência hídrica, conseqüentemente, é imprescindível o uso de metodologias que impulsionem o manejo racional da irrigação nas culturas.

Figura 02 – Série histórica das variáveis meteorológicas, referente ao período de 1990 a 2020. Nossa Senhora da Glória, SE, Brasil.



Fonte: elaborado pelo autor.

## 4.2 Contextualização metodológica

Para o desenvolvimento da pesquisa, um conjunto de procedimentos foram empregados para alcançar os objetivos específicos da pesquisa, sendo o método de abordagem o hipotético-dedutivo (Popper 1902-1994), com o intuito de corroborar ou refutar a hipótese em resposta ao problema identificado (GIL, 2002; MARCONI; LAKATOS, 2017).

Gil (2002), Prodanov e Freitas (2013) citam as formas clássicas de classificação de uma pesquisa, sendo utilizada para esta pesquisa: quanto à natureza – trata-se de uma pesquisa aplicada, pois objetiva a solução de problemas específicos com a inserção de uma ferramenta de uso prático aplicada no manejo da irrigação; quanto aos objetivos – trata-se de uma pesquisa explicativa, que registra, analisa, classifica e interpreta os fenômenos estudados ao explicar o que pode ocasionar perdas da produção e se há um uso excessivo de água para a irrigação; quanto aos procedimentos técnicos – refere-se a uma pesquisa experimental, uma vez que o procedimento que mais se adequa para o falseamento da hipótese é o experimental, contribuindo para as análises das amostras do grupo de controle e experimental, no laboratório e no campo; quanto à forma de abordagem – uma pesquisa quantitativa, com o uso de recursos e técnicas estatísticas, que contribuíram para a calibração dos sensores de umidade do solo, ajuste da medição<sup>9</sup> do sensor de vazão/volume da água, análise gravimétrica do solo, aspectos agrônômicos e comparação do grupo de controle e experimental, para garantir a confiabilidade das informações coletadas.

A pesquisa foi realizada em três etapas. A primeira foi relacionada à montagem e à instalação de um sistema de monitoramento de variáveis de campo como a umidade do solo e vazão/volume de água para subsidiar o manejo racional da água. A segunda etapa compreendeu a calibração dos sensores de umidade do solo para o tipo de solo da região e o ajuste da medição do sensor vazão/volume, visando conferir exatidão de medição<sup>10</sup> preliminar na determinação das variáveis. A terceira etapa foi relativa à aplicação do sensor no monitoramento da umidade em cultivo da alface, que foi realizado em dois ciclos, visando correlacionar a variação da umidade do solo com as lâminas aplicadas e a produtividade da cultura. Permitindo, assim,

---

<sup>9</sup> ajuste dum sistema de medição – “Conjunto de operações efetuadas num sistema de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados valores duma grandeza a ser medida. Nota 2: o ajuste dum sistema de medição não deve ser confundido com calibração, a qual é um pré-requisito para o ajuste”. (INMETRO, 2012, p. 36)

<sup>10</sup> Exatidão de medição – “ grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro ou mensurado”. (INMETRO, 2012, p. 36)

recomendar ou não o uso do equipamento para manejo de irrigação, com baixo custo de implantação.

### **4.3 Montagem do sistema de monitoramento de variáveis para irrigação**

O sistema foi instalado na propriedade rural com os seguintes equipamentos: um computador, um conversor para conexão USB/RS-485 e um cabo de rede de 24 AWG. Para o pleno funcionamento do sistema alguns softwares foram instalados, como o ScadaBR, para o acompanhamento das variáveis no sistema de controle e aquisição de dados e o drive CH341SRE.INF do circuito integrado (CI) CH-340, necessário para efetuar a conversão da porta USB para emular a porta serial COM visualizado no gerenciador de dispositivos do Microsoft Windows 2010, para realizar a leitura do protocolo Modbus RS-485.

Os equipamentos utilizados na área de plantio foram: um conversor RS-485/TTL, conectado a um cabo de rede, com a finalidade de receber e transmitir os dados do campo para o ScadaBR na propriedade rural; um microcontrolador Arduino (*open source*, da Arduino©) MEGA 2560, que foi programado em C++ no Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), com auxílio da biblioteca Modbus RTU\_RS485 adaptada, onde consta a programação para a leitura das informações dos sensores, display e do protocolo Modbus com o sistema SCADA; um regulador de tensão *step-down* LM2596, para evitar ruídos e picos de tensão no sistema que poderiam ocasionar flutuações nas leituras; 10 (dez) sensores de umidade instalados nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, com a finalidade de coletar dados do sinal analógico, que serão convertidos em umidade do solo em tempo real, após a calibração; um medidor de vazão/volume instalado numa mangueira de irrigação, para a leitura do volume de água empregado e a vazão na linha; e um display de LCD 20x4.

#### **4.3.1 Sistema supervisorio SCADA**

O sistema de Controle Supervisorio e Aquisição de Dados (SCADA), vem do inglês “*Supervisory Control And Data Acquisition*” e quando integrado a controladores lógicos programáveis e a microcontroladores tem como principais funções supervisionar, controlar e fazer a aquisição de dados de dispositivos instalados em campo, controlando o processo produtivo, inclusive através das informações coletadas, conseqüentemente, manipuladas,

analisadas, armazenadas e, posteriormente, apresentadas para a tomada de decisão (TIBURSKI; MOREIRA; MISAGHI, 2017).

Dentre os sistemas SCADA existentes, o software ScadaBR foi escolhido por ser uma plataforma *open source* e possuir licença gratuita. De acordo com o desenvolvedor<sup>11</sup>, as principais características de um sistema SCADA são proporcionar facilidade na visualização gráfica e operação do sistema, a geração automática de relatórios, o acompanhamento das variáveis controladas, permite o acesso automático a um banco de dados, além do acionamento de alarmes.

O Sistema de Controle Supervisório e Aquisição de Dados (SCADA) instalado, o software ScadaBR (Open Source, desenvolvido pela Sensorweb©), permitiu a aquisição e envio dos dados por cabeamento para o SCADA, juntamente com o uso do protocolo de comunicação Modbus RTU (Modbus Organization©), com o padrão RS-485 (aprovado em 1983 pela EIA – Electronics Industries Association). O SCADA foi utilizado para monitorar o funcionamento do sistema e armazenar os dados coletados no campo, para posterior análise das variáveis umidade e volume de água.

#### 4.3.2 Protocolo Modbus RS-485

O protocolo Modbus foi um dos primeiros amplamente aceitos como padrão de comunicação em redes industriais por ser *opensource* e também pela sua simplicidade e robustez (MODBUS-IDA, 2006). O protocolo Modbus é baseado em arquitetura *master/slaver* (mestre/escravo) e atua na camada de aplicação, onde o escravo somente atua a partir de uma requisição do mestre.

Este protocolo disponibiliza uma interface de comunicação entre dispositivos conectados em diferentes tipos de redes. Dentre os principais protocolos que operam no meio físico do tipo fio, a partir da transmissão serial, foi utilizado o padrão EIA/TIA-485-A (conhecido como RS485), com a variação do protocolo Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*), no qual os dados são transmitidos em formato binário de 8 bits, onde números inteiros de -32768 a 32767 podem ser representados por 2 bytes (MODBUS-IDA, 2006).

O padrão de barramento RS-485 é um dos projetos de barramento de camada física mais amplamente utilizados (MARAIS, 2008). Os principais recursos do RS-485 que o tornam ideal para uso em aplicações de comunicação são: links de longa distância de até 1219 metros,

---

<sup>11</sup> <http://www.scadabr.com.br/?q=downloads>

comunicações bidirecionais possíveis através de um único par de cabos trançados, a transmissão diferencial aumenta a imunidade ao ruído e diminuindo as suas emissões, vários *drivers* e receptores podem ser conectados no mesmo barramento, a ampla faixa de modo comum permite diferenças no potencial de terra entre o *driver* e o receptor, além de permitir taxas de dados de até 10 Mbps.

Portanto, a camada física da interface RS-485 é normalmente usada com um protocolo de nível superior. Isso permite a transmissão de dados robusta em distâncias relativamente longas. O RS-485 é especificado como um padrão multiponto, o que significa que até 32 transceptores podem ser conectados no mesmo barramento (MARAIS, 2008).

Uma rede RS-485 pode ter até 32 unidades de carga, com uma unidade de carga equivalente a uma impedância de entrada de 12000 ohms. Usando receptores de alta impedância, pode-se ter até 256 nós. Para mais nós ou longas distâncias, você pode usar repetidores que regeneram os sinais e iniciam uma nova linha RS-485 (AXELSON, 1999).

A Rede RS-485 apresenta a capacidade de atenuação dos ruídos eletromagnéticos, graças ao modelo diferencial de transmissão de dados, além de permitir conectar vários equipamentos em um único barramento possibilitando a centralização dos dados (GADELHA, 2019).

De acordo com Axelson (1999), em microcontroladores pode ser conectado um transceptor RS-485 para qualquer porta serial assíncrona. Sendo necessário um dispositivo com circuito integrado MAX485, responsável por converter sinais do padrão TTL<sup>12</sup> para RS-485. Isto é necessário para adequar a saída da UART<sup>13</sup> do microcontrolador para a rede que comunica o mestre com os escravos, também é necessário um bit para indicar ao MAX485 a ativação do recebimento ou transmissão pela UART (STANGA *et al.*, 2018).

Segundo Kugelstadt (2008), o RS-485 possui operação à prova de falhas, que é a capacidade do receptor de assumir um determinado estado de saída na ausência de um sinal de entrada, podendo perder sinal por três razões: circuito aberto, causado por uma quebra de fio, ou pela desconexão de um transceptor do barramento; curto-circuito, causado por uma falha de isolamento conectando os fios de um par diferencial a outro; ou quando nenhum dos drivers de barramento está ativo.

---

<sup>12</sup>TTL – *time to live* – refere-se ao limite de tempo imposto ao pacote de dados para estar na rede antes de ser descartado. A finalidade de um TTL é impedir que os pacotes de dados circulem para sempre na rede (GAST; VAN HOUTDT, 2017).

<sup>13</sup>UART – *Universal Asynchronous Receiver and Transmitter* – tem como objetivo converter dados paralelos em seriais e vice-versa (KASHYAP; RAVI, 2020).

### 4.3.3 Microcontrolador Arduino

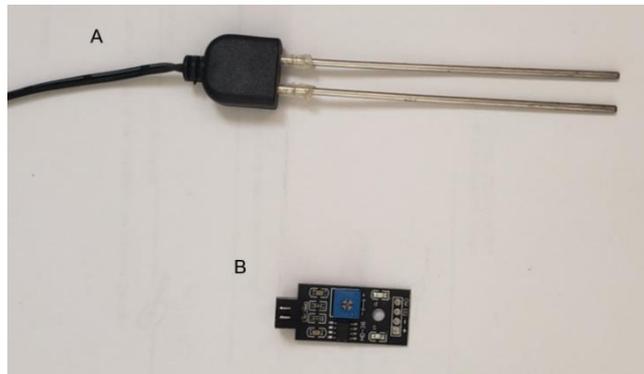
Um microcontrolador é um equipamento programável de pequeno porte e de baixo custo que tem como função realizar ações de controle de forma remota. O microcontrolador utilizado neste estudo foi o Arduino Mega 2560, que é uma placa microcontroladora baseada no ATmega2560. Possui 54 pinos de entrada/saída digital (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP, e um botão de reset.

De acordo com McRoberts (2015) Arduino é um dispositivo de Hardware e Software *open source* que pode ser reproduzido de forma genérica. Pode ser usado para desenvolver objetos interativos independentes ou ser conectado a um computador, a uma rede ou até mesmo à internet para recuperar e enviar dados do Arduino e trabalhar com eles.

### 4.3.4 Sensor de umidade do solo

Para a medição da umidade do solo foram utilizados 10 sensores de umidade resistivos, modelo HD-38, resistentes à corrosão (Figura 03). Este modelo de baixo custo consiste de duas sondas em aço inox, resistentes a corrosão, usadas para detectar mudanças na quantidade de água no solo, nas quais se aplica uma diferença de potencial de 3,3 a 12 VDC, operando com a variação da resistividade do solo através da corrente resultante entre as sondas e integradas ao módulo baseado no circuito integrado comparador LM393, conforme folha de dados (Anexo A).

Figura 03 – A) Sensor de umidade HD-38; B) Módulo com circuito integrado LM393.

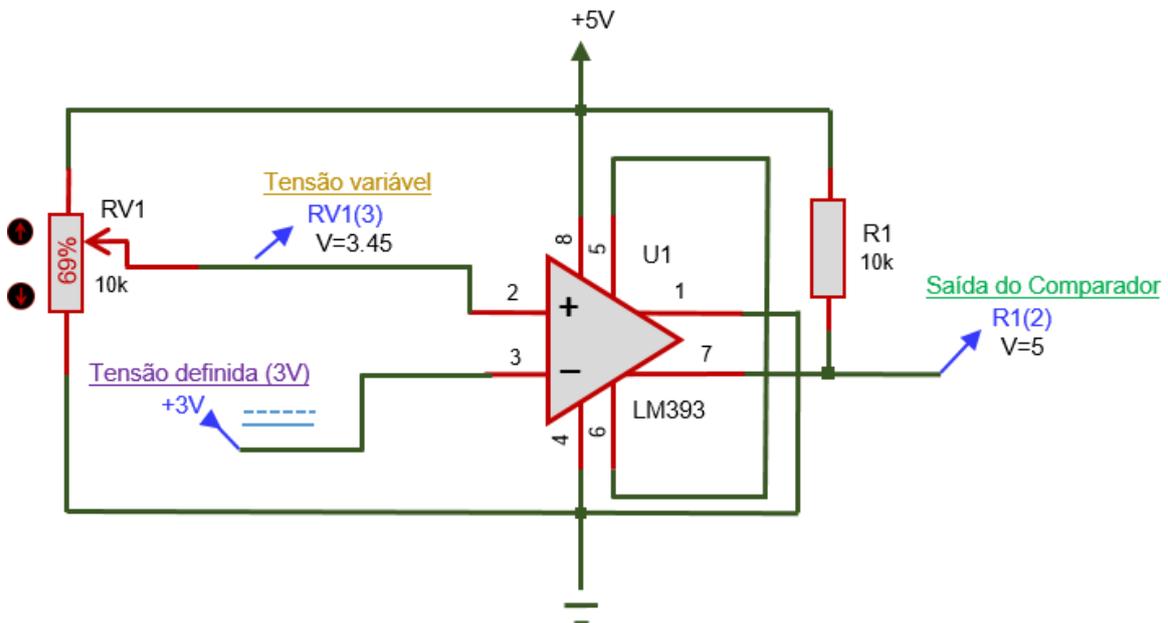


Fonte: elaborado pelo autor.

Internamente, o módulo (Figura 04) é formado por capacitores, os quais são responsáveis por armazenamento das cargas, transistores que atuam de forma a amplificar sinais e resistores que são utilizados para controlar a passagem de corrente, variando a tensão conforme a leitura do sensor. O circuito integrado comparador LM393 consiste em dois comparadores de tensão, precisos e independentes com a capacidade de converter sinal analógico em sinal digital.

Os sensores de umidade foram instalados em duas profundidades: 0 a 20 cm, que corresponde à profundidade de máxima intensidade radicular da cultura da alface, e 20 a 40 cm, para acompanhamento da umidade após o sistema radicular da cultura da alface.

Figura 04 – Circuito eletrônico do módulo do sensor de umidade integrado ao LM393.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.3.5 Sensor de vazão/volume de água

O modelo do sensor de fluxo usado para esta pesquisa é o YF-S201, mostrado na Figura 05. De acordo com o fabricante SEA ZHONGJIANG, este modelo de sensor funciona em uma tensão de 5 a 18V DC (corrente contínua), com saída de 5V, pode trabalhar com velocidade de vazão de até 30 litros/minuto, na faixa de temperatura de -25 a 80°C e umidade de 35% a 80% RH (umidade relativa). A precisão deste sensor varia em 10%. A pressão máxima da água aceitável de até 2 Mpa (YOESEPH *et al.*, 2022).

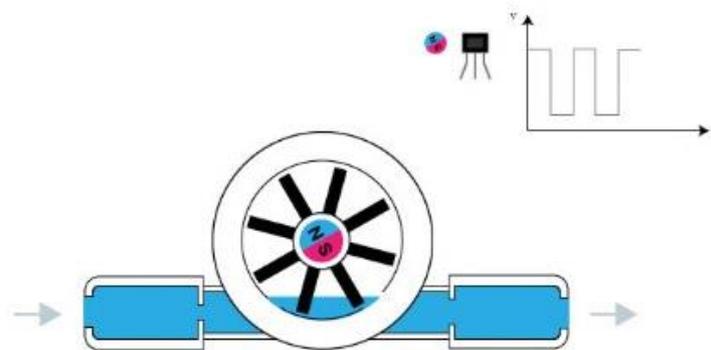
Figura 05 – Sensor de vazão YF-S201.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para funcionamento o sensor de vazão necessita ser submetido ao escoamento de um líquido, que em contato com a hélice a faz girar, fazendo com que a velocidade aumente conforme aumenta a velocidade do fluido que, por sua vez, é proporcional à vazão do volume. A cada volta, o sensor de efeito *hall* gera um campo magnético, que é acionado quando o ímã<sup>14</sup> fixado na ponta de uma das hélices passa próximo ao sensor *hall*, emitindo o sinal de pulso correspondente a frequência (HORIGOSHI, 2016) (Figura 06).

Figura 06 – Esquema do sensor de efeito *hall*.



Fonte: <https://wiki.seeedstudio.com/Water-Flow-Sensor/> (Acesso em 20 Fev., 2022).

Os dados do sensor de vazão foram calculados a partir das informações de calibração do fabricante, conforme folha de dados (Anexo B). O sensor de vazão modelo YF-S201 trabalha com uma constante de calibração  $k = 7$  para fluidos newtonianos, ou seja, com a viscosidade constante como a água. Para determinar as variáveis de vazão e volume no sistema foram

<sup>14</sup> Ímã – magneto.

aplicadas as equações seguintes, para que os dados fossem disponibilizados no display e ScadaBR.

$$f = k \times Q \quad (01)$$

Em que:

$f$  = frequência (Hz)

$k$  = constante de calibração (adimensional)

$Q$  = vazão (L/min)

Considerando os valores estabelecidos de vazão máxima de 30 L/min e a constante de calibração 7, obtem-se a frequência de 210 Hz (equação 01). A partir deste resultado podemos aplicá-lo na equação 02, deduzida conforme a folha de dados (anexo B\*) que o número de pulsos ( $n$ ) está relacionado a frequência (Hz) e o tempo (t). Como resultado para a vazão máxima, durante 12600 pulsos haverá fluído 30 L, ou seja, a partir da proporção definida pelo fabricante teremos: a cada 1 litro de água que fluir pelo sensor, estaríamos recebendo 420 pulsos/ L. Sendo assim, define-se a fórmula para o número de pulsos:

$$\left(f = \frac{V}{t}\right) \Rightarrow (n = f \times t) \quad (02)$$

Em que:

$f$  = frequência (Hz);

$V$  = volume (L);

$t$  = tempo (min);

$n$  = número de pulsos (adimensional).

Para o volume total obtido a partir da seguinte equação:

$$V = Q \times t \quad (03)$$

Em que:

$V$  = volume (L);

$Q$  = vazão (L/s);

$t$  = tempo (s).

A partir das equações supracitadas, foi inserida a equação 2 como fórmula geral na programação da IDE no Arduino, com a finalidade de determinar a vazão instantânea e o volume acumulado.

#### 4.4 Caracterização do solo

O solo foi caracterizado quanto à textura e à curva de retenção de água, para tanto, foram realizadas coletas de amostras de solo utilizando o trado adaptado ao tipo *Uhland*<sup>15</sup> (Figura 07), visando coletar amostras indeformadas com anéis de PVC rígido de 25,12 cm<sup>3</sup> de volume, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, totalizando 80 (oitenta) amostras.

As amostras de solo foram direcionadas ao Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Agrônômica da Universidade Federal de Sergipe, no Campus São Cristóvão, onde foram realizadas as análises físico-hídricas.

Figura 07 – Trado adaptado ao tipo *Uhland* utilizado para coleta de amostras do solo.



Fonte: elaborado pelo autor.

##### 4.4.1 Análise textural do solo

As amostras de solo coletadas foram submetidas a análise granulométrica (textural) através do método de densímetro (BOUYOUCOS, 1962, simplificado). Inicialmente, calculou-se a umidade em 30g de amostra do solo destorroado e peneirado em peneira de 2 mm, utilizando o método gravimétrico direto, usando a Equação 06.

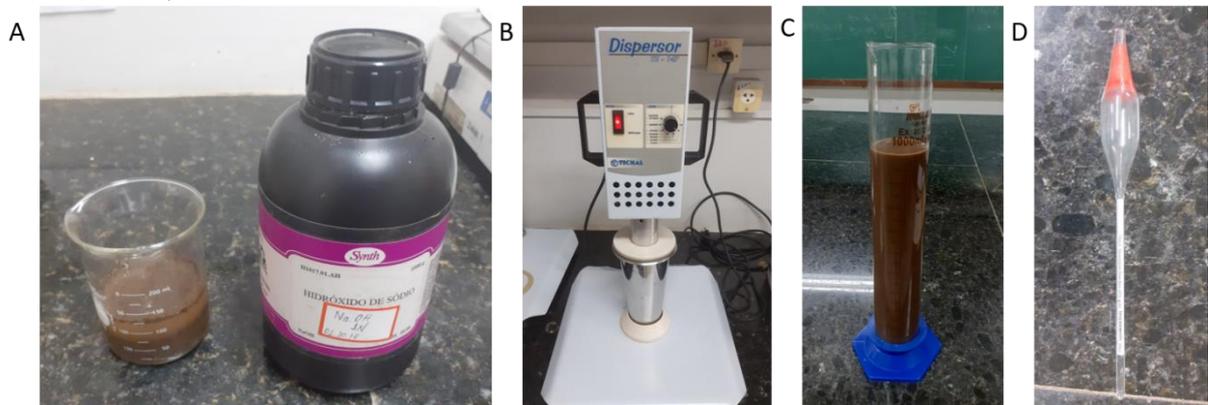
---

<sup>15</sup> Uhland - equipamento para a coleta de amostras indeformadas de solo.

A obtenção das frações granulométricas foi feita a partir de 100 g e 50g de terra fina seca ao ar (TFSA), para solo arenoso e solo argiloso, respectivamente, após serem peneirados em peneira de 2 mm. Posteriormente, em um bécker, foram adicionadas as amostras peneiradas a 100 mL de água destilada e 40 mL de hidróxido de sódio para TFSA argilosa e 20 mL para TFSA arenosa (Figura 08A).

Após 12 horas em repouso, as soluções foram colocadas no copo do agitador elétrico de Wagner a 14000 rpm durante 10 minutos para solo arenoso e 20 minutos para solo argiloso, acrescido de 300 ml de água destilada (Figura 08B). Passou-se a solução para uma proveta de 1000 ml através da peneira de 0,05 mm, completando o volume com água destilada (Figura 08C). Em seguida agitou-se a solução durante 1 minuto, com o uso de um agitador manual e, em local nivelado, anotou-se o tempo de início da sedimentação. A primeira leitura de densidade e temperatura da suspensão (Figura 08D) foi realizada aos 40 segundos e a segunda leitura após 2 horas do início da sedimentação. A areia retida na peneira de 0,05 mm foi lavada, levada à estufa por 24 horas a 105 °C e aferida a massa da terra fina seca em estufa (TFSE) em balança de precisão.

Figura 08 – A) Solução de amostra com adição de hidróxido de sódio; B) Agitador elétrico de Wagner da Tecnal, modelo TE-147; C) Proveta graduada de 1000ml com solução da amostra; D) Densímetro de Bouyoucos.



Fonte: elaborado pelo autor.

As frações de areia e argila foram obtidas por meio das equações 04 e 05:

$$Areia\ total\ (\%) = \frac{(m_{TFSE} - 1^{a}\ leitura\ corrigida)}{m_{TFSE}} \times 100 \quad (04)$$

$$Argila\ (\%) = \frac{2^{a}\ leitura\ corrigida}{m_{TFSE}} \times 100 \quad (05)$$

Em que:

$m_{TFSE}$  = massa da Terra Fina Seca em Estufa (g)

Com os valores dos percentuais de areia e argila, subtraindo-os de 100%, resultaram os teores de silte. Por fim, de posse dos dados de percentual de areia, argila e silte (Tabela 01) foi possível classificar o solo quanto à sua textura utilizando-se o triângulo textural usando o programa `@RStudio`, através da Linguagem de Programação R (Apêndice A), com o uso do pacote `'soiltexture'` distribuído gratuitamente na CRAN<sup>16</sup> (The Comprehensive R Archive Network).

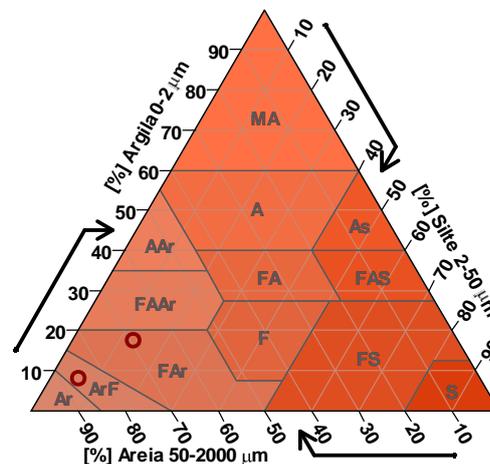
Tabela 01 – Composição granulométrica e classificação dos solos coletados. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Camada (cm)	Textura (%)			d <sub>s</sub>	Classificação textural
	Areia	Argila	Silte		
0-20	85,82	8,30	5,88	1,51	Areia Franca
20-40	69,46	17,79	12,75	1,69	Franco Arenosa

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos dados dispostos na Tabela 01, construiu-se o triângulo textural (Figura 09), podendo ser observado que o solo, na camada de 0-20 cm, pode ser classificado como areia franca, enquanto na camada de 20-40 cm a classificação é de franco arenosa.

Figura 09 – Triângulo textural para o solo da área de estudo. Em destaque (círculos vermelhos) a classificação textural: ArF (areia franca); FAr (franco arenosa). Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.



Fonte: elaborado pelo autor, utilizando o programa `@RStudio`, através da Linguagem de Programação R.

Ao considerar as classificações texturais das camadas, denota-se que a tensão a ser adotada para o valor de umidade na capacidade de campo é de 10 Kpa (BRITO *et al.*, 2011).

<sup>16</sup> CRAN é uma rede de ftp e servidores web em todo o mundo que armazenam versões idênticas, atualizadas, de código e documentação para R. (<https://cran.r-project.org/>, acesso em 02 Fev. 2022).

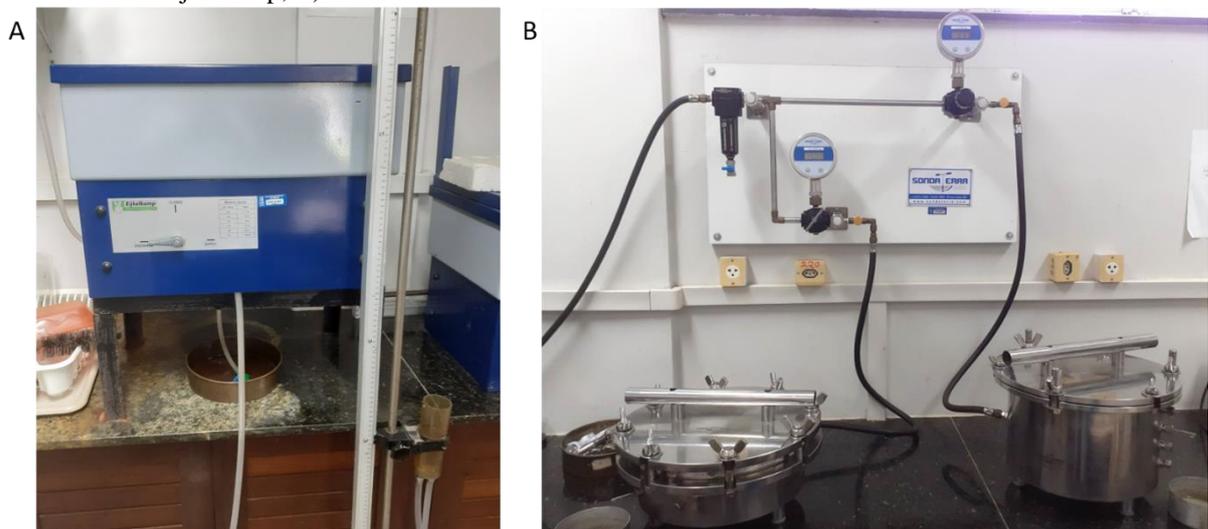
As densidades dos solos apresentadas na tabela 01 foram as médias obtidas a partir de dos canteiros 1 a 5, respectivamente, 1,54, 1,51, 1,46, 1,50 e 1,52 g/cm<sup>3</sup> na profundidade de 0-20 cm e de 1,74, 1,86, 1,64, 1,58 e 1,64 g/cm<sup>3</sup>, na profundidade de 20-40 cm.

#### 4.4.2 Curva de retenção de água do solo

A curva característica de umidade do solo foi feita usando a metodologia da câmara de Richards e mesa de tensão, sendo determinadas as umidades no solo quando se aplicou as tensões de 1, 2, 4 e 6 Kpa na mesa de tensão (sucção) (Figura 10A) e 10, 33, 100, 300, 500 e 1500 Kpa nos aparelhos extratores de Richards (Figura 10B) (RICHARDS, 1965; EMBRAPA, 2017).

Para mensurar a umidade do solo foi utilizado o método gravimétrico direto (padrão estufa), segundo Bernardo *et al.* (2019), que consiste na retirada de amostras do solo na profundidade que se deseja saber a umidade, colocando o solo em um recipiente, e umedecendo-o. Em seguida, pesou-se a amostra e secou-se em estufa por 48 horas a 105 °C, pesando novamente o solo seco.

Figura 10 – Equipamentos utilizados para determinar as tensões de retenção de água no solo: A) Mesa de tensão da Eijkelkamp; B) Extrator de Richards da SondaTerra.



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a obtenção das massas úmida e seca calculou-se a porcentagem da umidade do solo a partir das seguintes equações:

Para umidade em massa, método direto:

$$U_m = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de solo seco}} = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \quad (06)$$

Para umidade em volume, método direto:

$$U_v = \frac{M_1 - M_2}{\text{volume da amostra}} \times 100 \quad (07)$$

Para umidade em volume, método indireto, conhecendo a densidade do solo ( $d_s$ ):

$$U_v = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times d_s \times 100 = U_m \times d_s \quad (08)$$

Em que:

$U_m$  = umidade em massa;

$U_v$  = umidade em volume;

$M_1$  = massa da amostra de solo úmido (g)

$M_2$  = massa da amostra do solo seco (g);

$M_3$  = massa do recipiente (g);

$d_s$  = densidade do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

O método gravimétrico é o mais preciso e exige a necessidade de estufa, balança e instrumentos para coleta da amostra, além dos resultados somente serem obtidos após 24h, a partir da amostragem inicial (BERNARDO *et al.*, 2019). Portanto, a sua precisão permitiu confiabilidade na obtenção dos resultados da umidade do solo do local da pesquisa, o que não prejudicou a sua execução, pelo material ser considerado de fácil disponibilidade em laboratórios de pesquisa e o tempo de amostragem ser aceitável e estar inserido no planejamento das atividades.

No processo de determinação da umidade, as amostras indeformadas coletadas com o trado foram submetidas às tensões e, ao entrarem em equilíbrio hídrico, ou seja, não haver drenagem no orifício de saída, as amostras foram retiradas dos equipamentos e pesadas, obtendo-se a massa úmida. Em seguida, foram colocadas para secar em estufa, a fim de se obter a massa seca, a qual permitiu calcular a umidade do solo para cada tensão especificada, usando-se a equação 06.

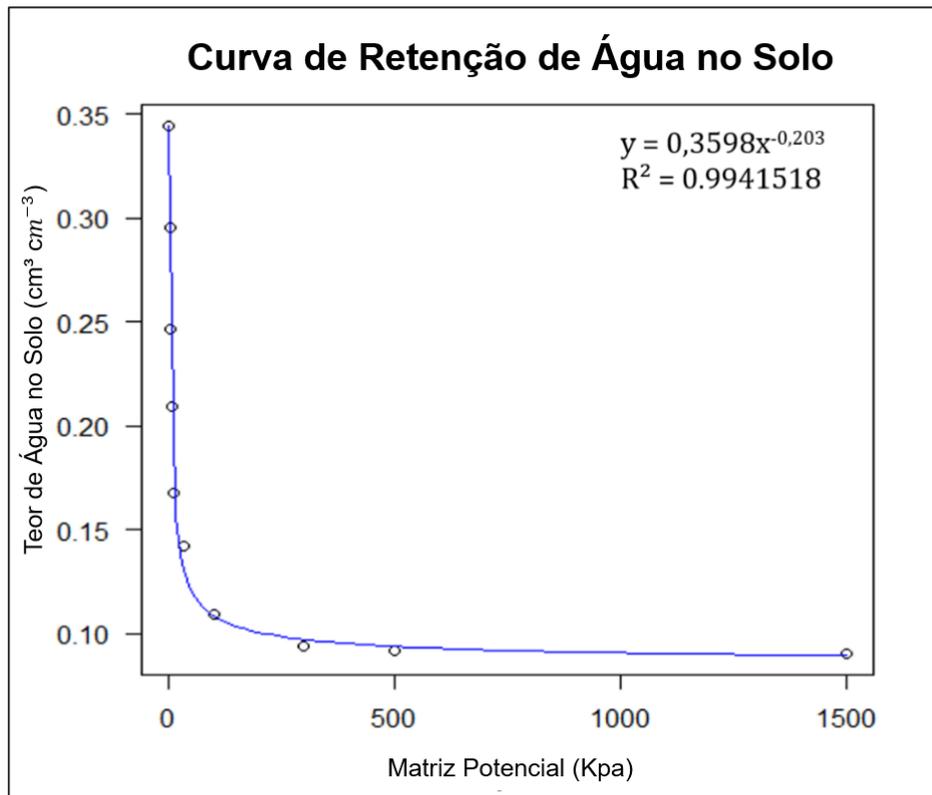
Os dados de umidade em cada tensão foram usados para se obter a curva característica de umidade, e ajustadas empregando o modelo matemático proposto por Van Genuchten (1980) (Equação 09), obtendo a curva corrigida (Figura 11) com o auxílio do programa RStudio e o uso do pacote ‘*soilphysics*’, distribuído gratuitamente na CRAN.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \times \psi_m)^n]^m} \quad (09)$$

Em que:

- $\theta$  - Umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  
 $\theta_r$  - Umidade volumétrica residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  
 $\theta_s$  - Umidade volumétrica de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  
 $\psi_m$  - Potencial matricial (Kpa);  
 $m, n$  e  $\alpha$  = Parâmetros de ajuste.

Figura 11 – Curva de retenção de água no solo da área experimental. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.



Fonte: elaborado pelo autor, utilizando o software @RStudio, através da Linguagem de Programação R.

Após o cálculo da umidade do solo nas tensões supracitadas e construção do gráfico, foram obtidos os dados estatísticos no próprio software do RStudio (Tabela 02) e manipulados na equação 10, estimando a umidade do solo a partir da curva de retenção de água.

Tabela 02 – Tabela da curva de retenção a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980). Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

	Estimativa	Erro Padrão	t value	Pr (>  t )
<b>Theta R</b>	0,084697	0,006726	12,593	1,54e-05 ***
<b>Theta S</b>	0,391875	0,024837	15,778	4,11e-06 ***
<b>Alpha</b>	0,698696	0,232296	3,008	0,0238 *
<b>n</b>	1,598326	0,092623	17,256	2,43e-06 ***
<b>m</b>	0,3743	-	-	-

Nível de significância \*\*\*0 e \* 0,01.

Fonte: elaborado pelo autor, utilizando o software @RStudio, através da Linguagem de Programação R.

$$\theta = 0,084697 + \frac{(0,391875 - 0,084697)}{[1 + (0,698696 \times \psi_m)^{1,598326}]^{0,3743}} \quad (10)$$

#### 4.5 Calibração do sensor de umidade do solo

A calibração foi realizada a partir da metodologia adaptada de Gomes, F. *et al.* (2017) e Sena *et al.* (2020), sendo coletadas 5 (cinco) amostras de solo indeformadas utilizando trado tipo *Uhland*, com anéis de PVC rígido com volume de 275,28 cm<sup>3</sup>, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, totalizando 10 (dez) amostras.

Considerando que os sensores possuem as mesmas características construtivas entre si, foram avaliados em uma única etapa sendo alimentados com a mesma tensão (4,9 volts) e realizada a leitura no ar e na água destilada, resultando nos valores de 1023 e 213, respectivamente, além da aplicação de um regulador de tensão Lm2596 ajustável tipo *step-down*, com a finalidade de manter a tensão estável e fixa, aumentando o nível de confiabilidade da informação. Assim sendo, considerando que os sensores possuem as mesmas características funcionais, somente um deles foi utilizado no procedimento de calibração<sup>17</sup>.

Na calibração do sensor de umidade do solo, foi adotado o método gravimétrico direto (padrão estufa) para a determinação da umidade, por ser o método mais preciso e utilizado como padrão para calibração em outros métodos (BERNARDO *et al.*, 2019).

Por se tratar de solo arenoso, as amostras foram saturadas e submetidas à tensão de 10 Kpa no extrator de Richards, para capacidade de campo, e de 1500 Kpa, para ponto de murcha permanente, e após entrarem em equilíbrio hídrico, procedeu-se a determinação da umidade volumétrica usando-se dados gravimétricos e o conhecimento do volume da amostra. Em seguida, os sensores foram inseridos nas amostras de solo para a leitura em tempo real, na unidade de resolução de 10 bits apresentados em valores inteiros de 0 a 1023 na saída analógica do microcontrolador.

Após as amostras passarem pelo processo de saturação e equilíbrio com a tensão equivalente à capacidade de campo, procedeu-se à determinação da leitura da umidade das amostras com o sensor nos seguintes intervalos: imediatamente após a retirada do extrator de Richards, após 1 hora, 2 horas, 4 horas, 6 horas, 24 horas, totalizando 6 leituras. Ao mesmo

<sup>17</sup> “Calibração – Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas”. (INMETRO, 2012, p. 27).

tempo, as leituras eram visualizadas através de um display e pelo sistema SCADA<sup>18</sup>. Com os dados de umidade e do sinal analógico, foi construído o gráfico com o coeficiente de determinação e correlação, assim como a equação de regressão para a calibração do sensor, que por meio de interpolação linear, converteu-se o sinal analógico em porcentagem.

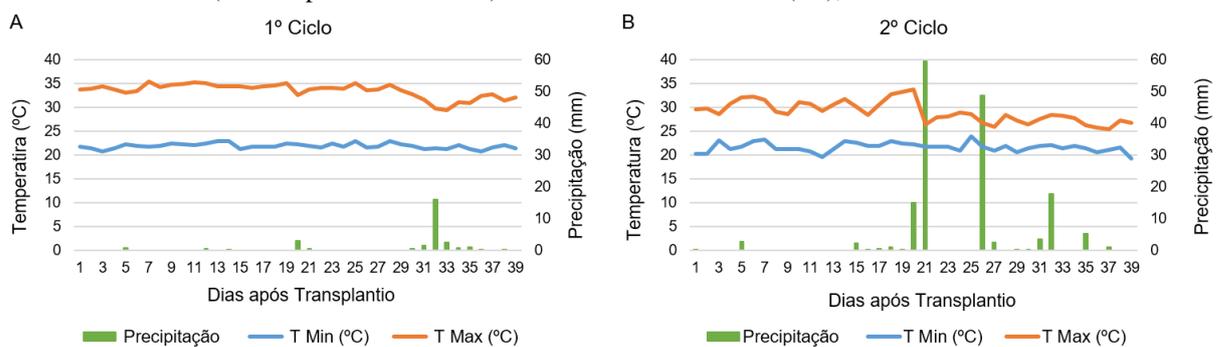
## 4.6 Cultivo de alface sob lâminas de irrigação

### 4.6.1 Condições climáticas

Os índices pluviométricos foram obtidos a partir dos dados de uma estação meteorológica automática (A453) localizada no município em que o estudo foi realizado, administrada pela Embrapa Semiárido.

No período que ocorreu o primeiro ciclo de cultivo, entre os dias primeiro de fevereiro e onze de março de 2022 (Figura 12A), observou-se baixo índice pluviométrico, chegando a somar 26,7 mm no período total do transplântio à colheita, com uma máxima registrada de 16 mm/dia. Houve uma variação de temperatura entre a máxima e a mínima, respectivamente, entre 35,47 °C e 20,73 °C.

Figura 12 – Temperaturas mínimas, máximas e precipitações diárias durante o primeiro e segundo ciclos de cultivo (do transplântio à colheita). Nossa Senhora da Glória (SE), 2022.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir de dados do Agritempo – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (<https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=SE>).

Durante o segundo ciclo, ocorrido entre os dias trinta de abril e sete de junho de 2022 (Figura 12B), ocorreu um elevado índice pluviométrico em comparação ao ciclo anterior, registrando 159 mm durante o período, com máxima registrada de 59,5 mm/dia, ultrapassando

<sup>18</sup> SCADA – Supervisory control and data acquisition, com a utilização do software ScadaBR (OpenSource, desenvolvido pela Sensorweb©).

o dobro da precipitação total do ciclo anterior, sobretudo as temperaturas mais baixas, registrando mínima de 19,26 °C e máxima 33, 76 °C. As irregularidades climáticas são típicas de regiões semiáridas, constituídas de duas condições climáticas bem definidas, seca e chuvosa (LEITE; JÚNIOR; OLIVEIRA, 2018).

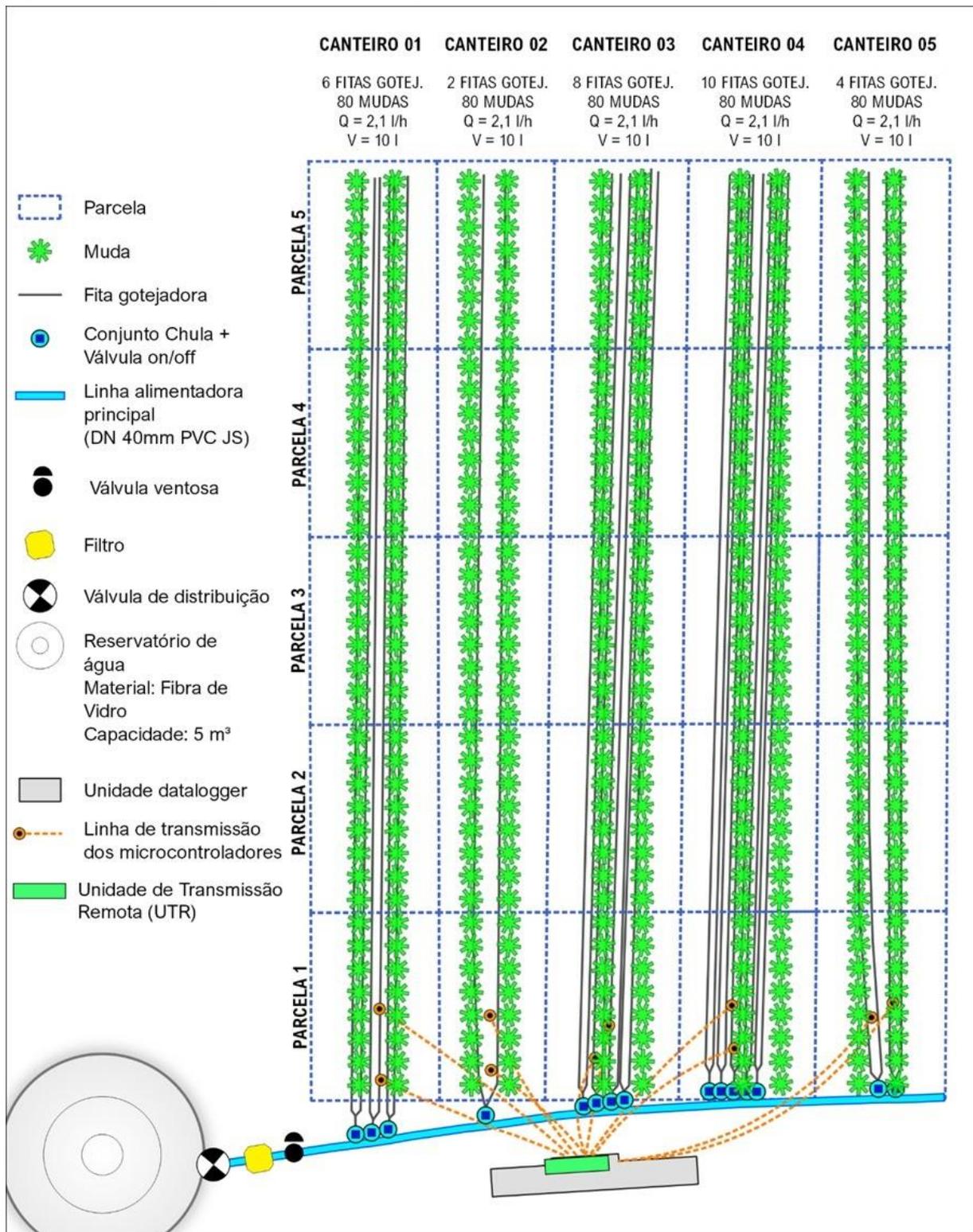
#### 4.6.2 Manejo do solo

Os canteiros usados para o cultivo de alface foram preparados conforme técnicas de cultivo orgânico usadas pela produtora rural, Maria da Horta, sendo realizada a limpeza da área, o revolvimento manual do solo, e em seguida procedeu-se à abertura de valas no local onde seriam confeccionados os canteiros, por conseguinte, foram adicionados restos vegetais e esterco bovino como matéria orgânica.

Foram utilizados dois tipos de matéria orgânica/adubo desenvolvida e empregada pela agricultora, ambos conhecidos como adubo sertanejo e o adubo foliar, sendo o primeiro constituído de pó de rocha, carvão mineral, esterco de ovelha, soro do leite e folhas secas de outras culturas existentes no próprio terreno. O segundo tipo continha folhas secas com terra de quixabeira, pó de rocha e açúcar mascavo. Utilizando um carrinho de mão como medidor, aplicou-se uma medida para cada tipo de adubo/matéria orgânica em cada canteiro que continha dimensões de 1 m de largura, 10 m de comprimento e 0,25 m de altura.

O sistema de irrigação foi instalado na área após o preparo dos canteiros, seguindo a distribuição de tubulações disposta na Figura 13, conforme disposição dos tratamentos. O manejo do solo descrito foi aplicado nos dois ciclos.

Figura 13 – Desenho esquemático da área do experimento.



\*Área de cada canteiro:  $10\text{m}^2$ .

Fonte: Raimundo R. Melo Neto e GESI – Grupo de Estudos em Salinidade e Irrigação, 2022.

#### 4.6.3 Tratamentos e delineamento experimental

Durante os dois ciclos, o transplântio ocorreu após o preparo dos canteiros, com mudas provenientes de produtores da região, sendo adquiridas 400 mudas da alface crespa para cada ciclo (Figura 14A), e se encontravam com 21 dias após sementeira (DAS) (Figura 14B).

No primeiro ciclo, as irrigações ocorreram em turno de rega intermitente, procedendo-se duas irrigações diárias, com tempo de 20 minutos cada, conforme manejo usado pela produtora, sendo possível obter as lâminas de 6,13, 2,99, 15,45, 23,24 e 9,78 mm/dia, respectivamente, aplicadas nos canteiros de 1 a 5. Observa-se que as lâminas dos canteiros 3 e 4 foram excessivas, porém, foram referenciadas a partir do manejo da agricultora que utiliza uma configuração de seis fitas gotejadoras (Canteiro 1), sendo considerado por essa pesquisa como uma lâmina de 100% e as demais lâminas definidas com o emprego de duas fitas (50%), oito fitas (125%), dez fitas (150%) e quatro fitas (75%), nessa ordem, inseridas nos canteiros 2 a 5. A colheita da cultura da alface foi realizada 39 (trinta e nove) dias após o transplântio (DAT), totalizando um ciclo do cultivo de 60 dias (Figura 14C).

Figura 14 – A) Mudanças de alface crespa (*Lactuca sativa* L.) com 21 dias; B) Área do experimento imediatamente após o transplântio das mudas de alface; C) Área do experimento no dia das coletas das amostras.



Fonte: elaborado pelo autor.

As lâminas de irrigação foram aplicadas na cultura da alface usando um delineamento experimental em faixas, devido disposição dos canteiros, custo e facilitar a visualização do

experimento pela agricultora. Neste sentido, cada canteiro (faixa), recebeu uma lâmina de irrigação, que foram equivalentes a 93, 190, 304, 480 e 724 mm para reposição da demanda hídrica da cultura, com base no manejo de irrigação da produtora, em especial pelas condições das plantas no canteiro 1.

Cada canteiro tinha comprimento de 10 m, sendo dividido em cinco parcelas, cada uma correspondendo a uma repetição, onde foram transplantadas as mudas de alface, distribuídas em duas linhas, com espaçamento de 0,40 m entre plantas e entre linhas. Assim, os cinco tratamentos foram repetidos em cinco blocos, totalizando 25 parcelas, sendo a unidade experimental composta por 10 plantas, das quais três foram selecionadas como úteis.

O sistema de irrigação utilizado foi localizado por gotejamento, com acionamento usando a gravidade. Nas linhas laterais foram usadas fitas gotejadoras com vazão de fábrica de  $2,1 \text{ Lh}^{-1}$ , quando se tem uma pressão de serviço entre 10 e 40 mca. Na linha de derivação foram usados tubos de PVC 50 mm, sendo estes conectados a uma caixa d'água de 5.000 L.

Ao considerar que as fitas gotejadoras estavam trabalhando em uma pressão de serviço abaixo do recomendado pelo fabricante, procedeu-se a determinação da vazão (Q) adaptando-se a metodologia proposta por Karmeli e Keller (1975). Foram escolhidos 06 (seis) gotejadores situados no 1º, 2º, 3º e 4º quartil do canteiro. Com o auxílio de um cronômetro, foi realizada aferição do tempo (em segundos) que cada gotejador demorou para preencher um recipiente com capacidade de 50 mL.

Para o teste de uniformidade foi utilizada a distribuição de Christiansen (CUC) por faixa (Equação 11).

$$CUC = 100 - \left\{ 1 - \frac{|q - \bar{q}|}{n \cdot \bar{q}} \right\} \quad (11)$$

Em que:

CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

q = vazão por emissor ( $\text{L.h}^{-1}$ );

$\bar{q}$  = média das vazões ( $\text{L.h}^{-1}$ );

n = número de aspersores.

A Tabela 03 contém os dados de vazão dos gotejadores e do CUC de cada canteiro de cultivo (faixa), sendo observado, onde se tinha maior diferença de nível, uma maior vazão.

Tabela 03 – Variáveis do teste de uniformidade. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Canteiro	Vazão média (L/h)	CUC (%)	Classificação*
1	0,306	89,77	Ótimo
2	0,449	93,82	Excelente
3	0,579	91,35	Excelente
4	0,697	92,58	Excelente
5	0,733	91,40	Excelente

\*Classificação recomendada segundo Bernardo *et al.* (2006).

Fonte: elaborado pelo autor.

O segundo ciclo ocorreu no período chuvoso, quando se registrou 159,3 mm de chuva durante o ciclo da cultura, sendo necessário reduzir a irrigação, que ocorreu durante dois turnos de rega e com a duração entre 15 e 30 minutos cada, totalizando 12 eventos. A irrigação foi executada pela agricultora, orientada por um display instalado no campo, com as seguintes informações disponíveis: a umidade do solo em tempo real, o tempo para irrigação, a umidade na capacidade de campo e ao atingir a umidade crítica. A colheita no segundo ciclo foi realizada 39 (trinta e nove) dias após transplântio (DAT), totalizando um ciclo do cultivo de 60 dias.

Para determinar a demanda hídrica e a reposição da lâmina líquida de irrigação no segundo ciclo foi calculado o fator de disponibilidade ( $f$ ) da cultura da alface que, de acordo com Allen *et al.* (1998), corresponde a 0,30. O valor de  $f$  pode ser ajustado pela equação:

$$f = f_{tab} + 0,04(5 - ET_c) \quad (12)$$

Em que:

$f_a$  = coeficiente de disponibilidade da alface

$f_{tab}$  = coeficiente de disponibilidade tabelado

$ET_c$  = evapotranspiração da cultura (mm.dia<sup>-1</sup>)

Para determinar a taxa de evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) foi calculada a evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ) através do balanço hídrico na zona radicular das plantas (BHR), conforme equação 13:

$$ET_m = \frac{I-D}{S} \quad (13)$$

Em que:

$ET_m$  = evapotranspiração máxima (mm.dia<sup>-1</sup>)

$I$  = irrigação realizada e medida no dia anterior (mm)

$D$  = água drenada no dia seguinte medida pelo sensor (mm)

$S$  = superfície de abrangência (m<sup>2</sup>)

Os dados do balanço hídrico na zona radicular foram calculados durante o primeiro ciclo, registrando no sistema SCADA a umidade do solo antes e após a irrigação, assim, calculando a evapotranspiração real da cultura ( $ET_r$ ).

A partir da equação de Penman-Monteith (equação 14) foi calculada a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), cujos dados foram obtidos de uma estação meteorológica da EMBRAPA Semiárido, localizada no município de desenvolvimento da pesquisa, com a finalidade de determinar o coeficiente da cultura da alface ( $K_c$ ) e assim, determinar a  $ET_c$  (equação 15) para cálculo do fator  $f$  ajustado.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma + \frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (14)$$

Em que:

$ET_0$  = Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>)

$R_n$  = Saldo de Radiação (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)

$G$  = Fluxo total diário de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>)

$T$  = Temperatura média diária do ar (°C)

$U_2$  = Velocidade do vento média diária à altura de 2 m (m s<sup>-1</sup>)

$e_s$  = Pressão de saturação do vapor médio (kPa)

$e_a$  = Pressão atual do vapor médio (kPa)

$(e_s - e_a)$  = Déficit de saturação de vapor médio diário (kPa)

$\Delta$  = Declividade da curva da pressão do vapor em relação à temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>)

$\gamma$  = Coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>)

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (15)$$

Em que:

$ET_c$  = evapotranspiração da cultura (mm dia<sup>-1</sup>)

$ET_0$  = Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>)

$K_c$  = coeficiente da cultura da alface

Além disso, foi possível calcular a capacidade real de água do solo (CRA), a fim de estabelecer a umidade crítica para irrigar a cultura, evitando assim atingir o ponto de murcha permanente (PMP).

$$CRA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})10 \times z \times f \quad (16)$$

Em que:

CRA= Capacidade real de água (mm)

$\theta_{CC}$  = umidade na capacidade de campo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\theta_{PMP}$  = umidade no ponto de murcha permante ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

Z= zona de profundidade do sistema radicular da cultura (cm)

f= fator de disponibilidade (adimensional)

A partir da definição da umidade do solo na capacidade de campo e da leitura da umidade obtidas a partir de um sensor de umidade do solo calibrado com amostras de solo local a 10 Kpa, foi calculada a lâmina líquida (LL), utilizando a seguinte equação:

$$LL = z \times \frac{(\theta_{CC} - \theta_{Crítica})}{10} \quad (17)$$

Em que:

LL= lâmina líquida (mm);

Z= profundidade da zona radicular da alface (cm)

$\theta_{CC}$  = umidade na capacidade de campo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\theta_{Crítica}$  = umidade crítica ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

Com a obtenção da LL e conhecendo a área do canteiro, a vazão e o número das mangueiras utilizadas no canteiro foi possível determinar o tempo necessário para irrigar a cultura a partir da leitura da umidade atual do solo até atingir a umidade na capacidade de campo, e assim, com as informações sendo acompanhadas no display instalado no campo, auxiliar na decisão do agricultor o tempo em que deverá manter a irrigação da cultura para obter uma lâmina ideal, acima da umidade crítica.

$$t = \frac{V}{Q \times n^{\circ} \text{ emissor}} \quad (18)$$

Em que:

t = tempo (h)

V = volume (L)

$Q = \text{vazão do emissor (L h}^{-1}\text{)}$

Sendo assim, ficou disponível no display o tempo (em minutos) que será necessário para irrigar a cultura, mantendo a umidade entre a capacidade de campo e a umidade crítica.

#### 4.6.4 Variáveis analisadas

As amostras foram levadas ao Laboratório Multiusuário da UFS/Campus Sertão (Figura 15) para verificação das variáveis de crescimento, fisiológicas e de produção.

As variáveis agronômicas massa fresca da planta, massa fresca da parte aérea, diâmetro da cabeça da alface, índice SPAD (*soil plant analyses development*), clorofila, área foliar da amostra, massa seca da raiz, massa seca do caule, massa seca da parte aérea, diâmetro do caule e número de folhas foram avaliados no ciclo 1 para a definição da lâmina eficiente, a ser utilizada como referência para o manejo da irrigação no segundo ciclo. No segundo ciclo, as variáveis agronômicas massa fresca da parte aérea, área foliar da amostra, diâmetro do caule e número de folhas foram avaliadas com a finalidade de validação do equipamento para orientar o agricultor no manejo da irrigação.

Figura 15 – Amostras de alface organizadas para processamento de coleta das variáveis no Laboratório Multiusuário da UFS/Campus Sertão.

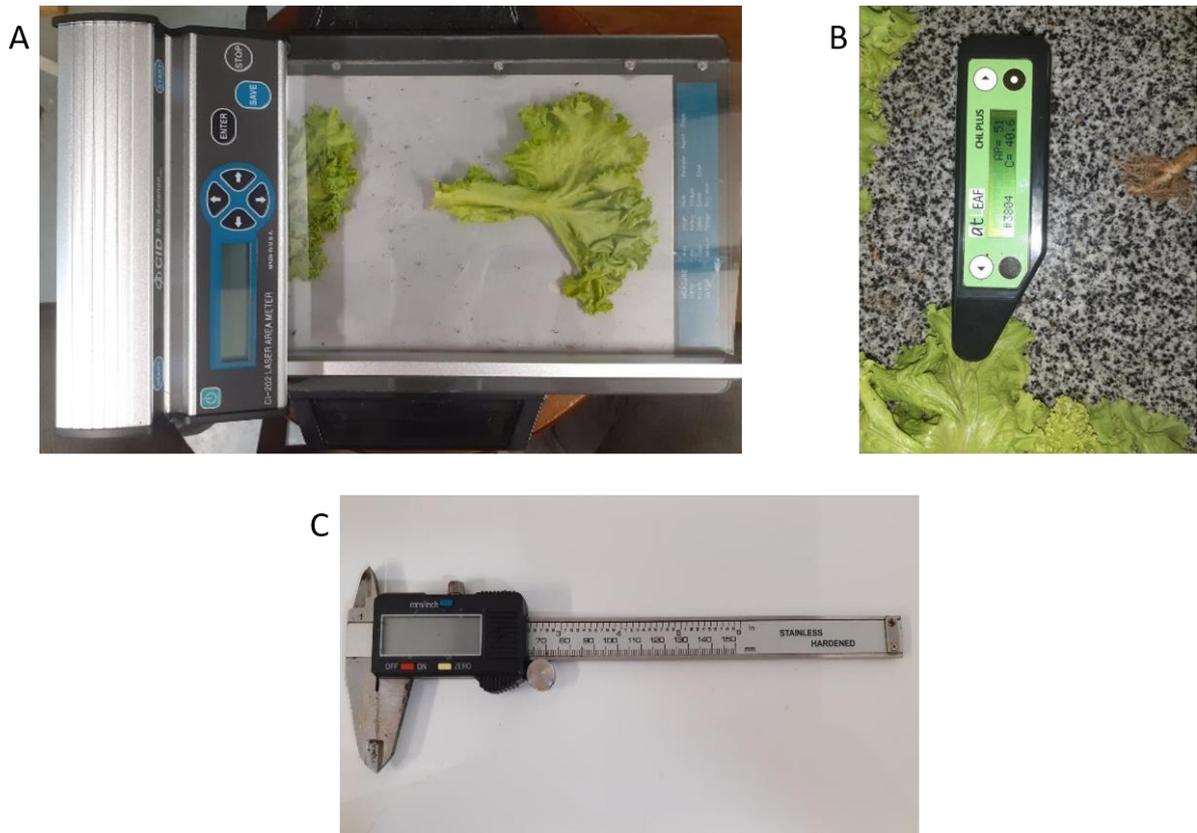


Fonte: elaborado pelo autor.

Para medir a área foliar, foi utilizado o medidor de área foliar a laser, modelo CI-200, da CID Bio-science® (Figura 16A). O medidor eletrônico de clorofila, modelo CHL PLUS, da

atLEAF® (Figura 16B) foi utilizado para medir o teor de clorofila da cultura. O paquímetro digital da Clarke® (Figura 16C) foi utilizado para mensurar o diâmetro do caule.

Figura 16 – Equipamentos utilizados: A) medidor de área foliar a laser, modelo CI-200, da CID Bioscience®; B) medidor eletrônico de clorofila, modelo CHL PLUS, da atLEAF®; C) paquímetro digital da Clarke® para medição do diâmetro do caule.



Fonte: elaborado pelo autor.

A massa fresca de cada planta foi verificada com a utilização de uma balança digital (precisão de 0,01g) modelo AD3300 da Marte Científica & copy®. Para mensurar a massa seca, o material foi submetido à secagem em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C, por 72 horas, para então ser pesado novamente em balança digital.

A mensuração do número de folhas foi realizada de forma manual e foram consideradas somente aquelas com mais de 3 cm de comprimento.

#### 4.7 Análises estatísticas

Os dados estatísticos para a curva de retenção foram gerados pelo software RStudio, utilizando o test t de student ( $p < 0,01$ ).

Na calibração dos sensores de umidade, foram utilizados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e de correlação ( $r$ ) para explicar a variação da umidade do solo com a leitura dos sensores.

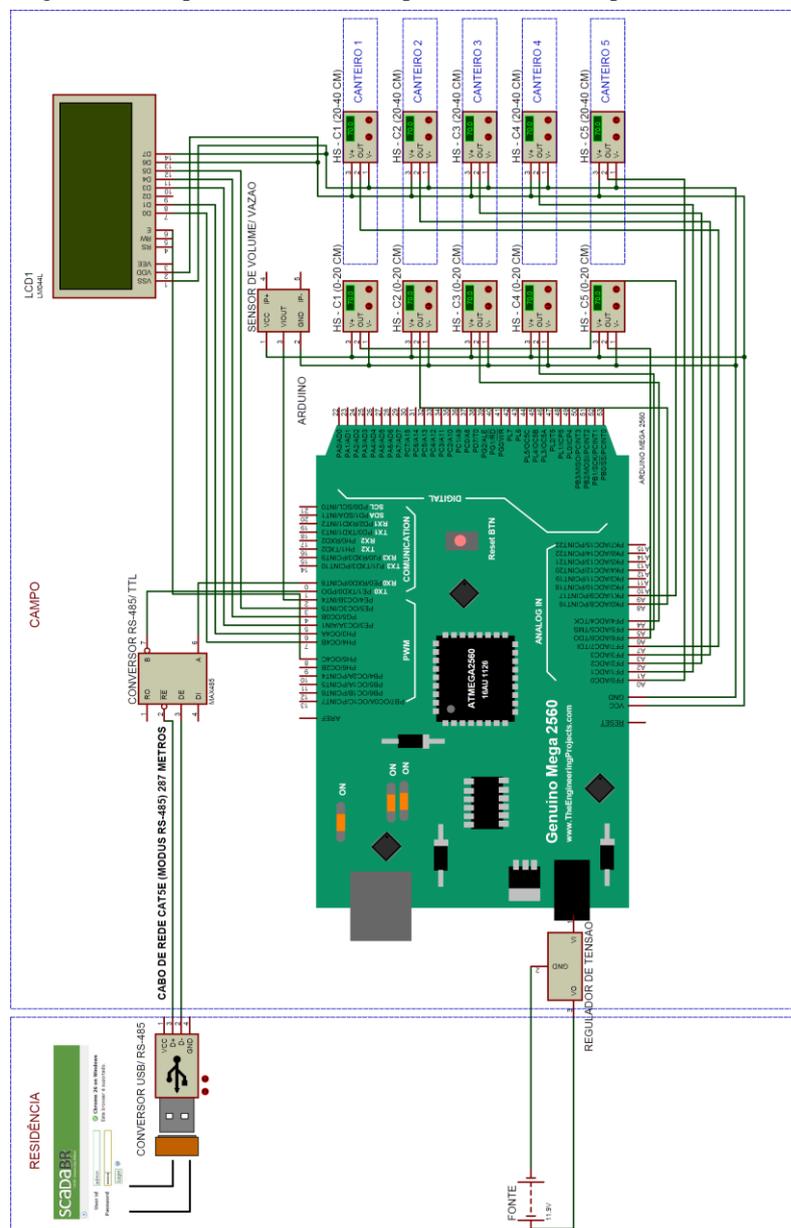
As análises estatísticas dos aspectos agronômicos foram para os valores médios das variáveis de crescimento, fisiológicas e de produção, submetidas a Análise de Variância (ANOVA), empregando-se o teste F, a 5% de probabilidade, por se tratar de experimento com fator quantitativo, usou-se a análise utilizando o software estatístico SISVAR, versão 5.8.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Montagem e funcionamento do sistema de monitoramento

O sistema foi montado seguindo o esquema descrito na Figura 17, e tem por finalidade coletar os dados dos sensores instalados no campo (umidade, vazão e volume de água), para posterior acompanhamento da taxa de evapotranspiração real da cultura ( $ET_r$ ) e do volume da água aplicada durante o período de cultivo.

Figura 17 – Esquema do sistema implantado na área experimental.

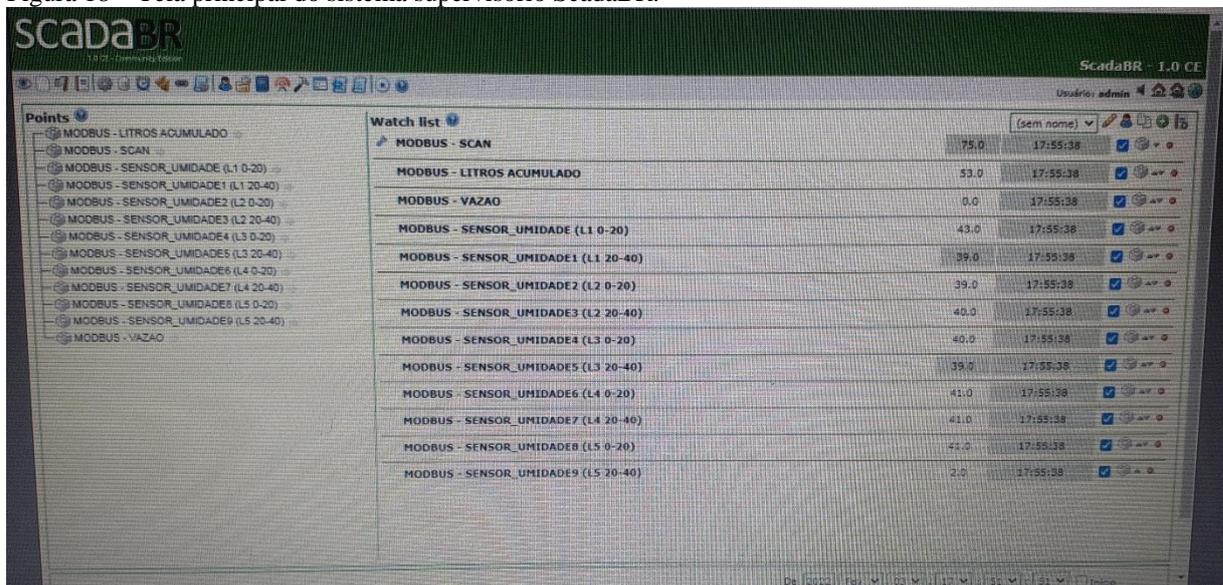


Fonte: elaborado pelo autor, utilizando software Proteus 8 Professional.

O pleno funcionamento do sistema de recepção de dados e o tempo de resposta foram diagnosticados por meio de teste da rede, com a criação de um dado SCAN (*baud rate*), que é a taxa de transmissão na qual a informação é transferida no canal de comunicação. A leitura da taxa de comunicação foi incluída na programação do *software* do microcontrolador Arduino para a varredura da *baud rate* em 9600 bits/s, sendo convertido em porcentagem no software ScadaBR. Foi observado, após a instalação do dispositivo mestre e escravo e dos demais instrumentos durante a transmissão de dados, que a rede RS-485 se manteve estável durante todo o manuseio.

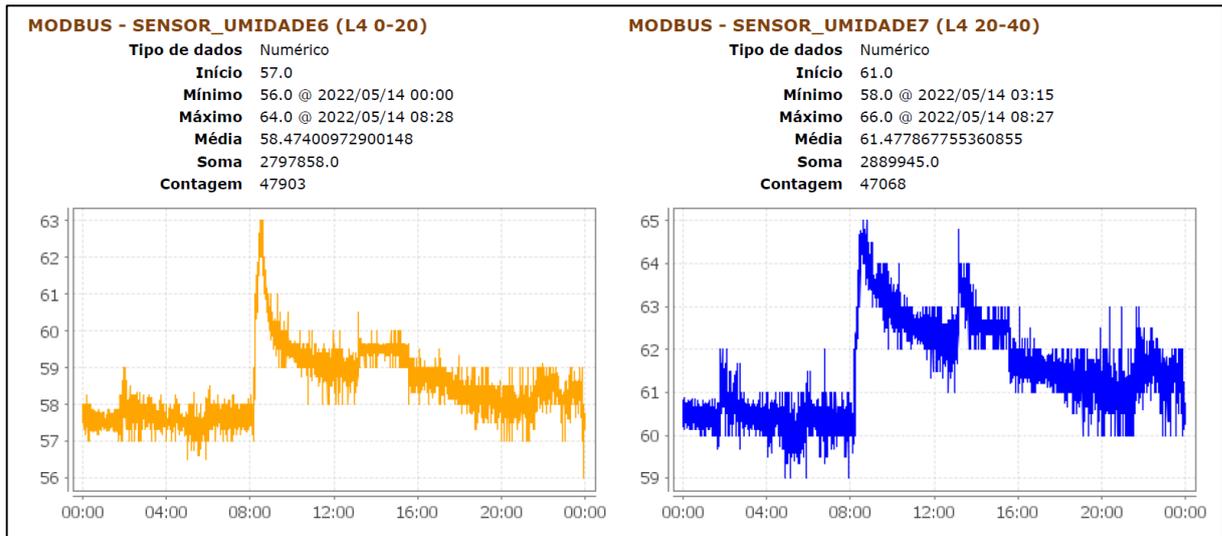
Constatou-se que o sistema coletou os dados durante o tempo de sua aplicação registrando-os na base de dados do ScadaBR, sendo utilizado o banco de dados Derby que vem na instalação *default*, coletando-os a cada 5 segundos como o programado no sistema SCADA (Figura 18). Ainda no banco de dados, além de registrar a taxa de transmissão, registrou-se também as variáveis umidade do solo, dos 10 sensores, e o volume de água acumulada do sensor instalado na linha secundária de irrigação (Figura 19).

Figura 18 – Tela principal do sistema supervisor ScadaBR.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 – Gráficos com exemplos de dados de umidade coletados pelo sistema de aquisição.



Fonte: elaborado pelo autor, a partir do banco de dados do ScadaBR.

Ao utilizar o protocolo RS-485, devido a sua confiabilidade na troca de informações em tempo real, registrou também a umidade do solo antes e após a irrigação, o que contribuiu para a tomada de decisão no manejo. Gadelha (2019) utilizou o padrão RS-485 com o objetivo de realizar comunicação multiponto, a fim de elevar a confiabilidade na troca de mensagens, visando monitorar e também registrar as informações de produção e com isso acompanhar remotamente os processos, possibilitando tomadas de decisões mais rápidas e eficazes.

O sensor de vazão/volume foi instalado no canteiro 3, para acompanhar a vazão instantânea na linha do sistema de irrigação e conhecer o volume total de água aplicada durante o ciclo do cultivo.

Para aferição do sensor de vazão/volume, foram utilizados os dados empregados no teste de vazão de emissores, adaptando-se a metodologia proposta por Karmeli e Keller (1975). O sensor foi instalado em uma tubulação a montante de uma bifurcação em “Y” (Figura 20) onde foram conectadas 2 fitas gotejadoras, cada uma contendo 50 gotejadores. Calculou-se a vazão da tubulação em que estava conectado o sensor, considerando a soma do volume dispensado por cada gotejador durante o tempo do teste, obtendo-se 0,95 L/min. Através da equação 01 e a constante  $k=7,0$  (vide anexo B), calculou-se a frequência ( $f$ ), para então calcular o número de pulsos produzidos para cada litro, com aplicação da equação 02.

Figura 20 – Sensor de vazão/volume instalado a montante de bifurcação em “Y”.



Fonte: elaborado pelo autor.

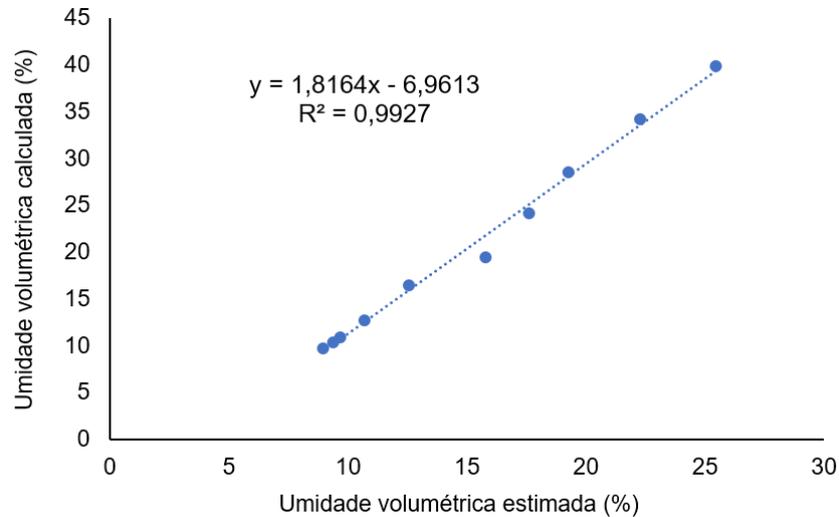
Desta maneira, o sensor emitirá 402 pulsos para 0,95 litros de água que passará por ele, portanto, se 1 litro de água fluir pelo sensor, obteremos 423 pulsos. Assim, relacionou-se o número de pulsos para cada litro, aplicando-o na programação da IDE do Arduino para cálculo da vazão e do volume acumulado. Cabe ressaltar que não foi possível visualizar no display a vazão no canteiro 3, somente a partir do 4º canteiro, devido apresentar a vazão dentro da faixa de leitura do sensor, definida pelo fabricante (a partir de 1 L/min).

Iyengar (2016) empregou um sensor de vazão modelo YF-S201 com a finalidade de monitorar o consumo de água em domicílio, visando reduzir a prática de desperdício, desta maneira, calculou-se a vazão e o volume de água acumulado mensalmente, aplicando a constante  $k = 7,5$  e 450 pulsos por litro.

## 5.2 Calibração dos sensores de umidade

O modelo proposto por Van Genuchten (1980) é o mais utilizado, mundialmente, principalmente por ter seus parâmetros estimados a partir de funções de pedotransferência, o que torna o método consistente e objetivo, admitindo predizer a retenção e a disponibilidade de água no solo (DEXTER, 2004). Desta maneira, com a curva de retenção de água ajustada a partir da equação de Van Genuchten, foi obtido o modelo matemático da equação 09, gerando o gráfico da Figura 21.

Figura 21 – Umidade volumétrica calculada para a curva de retenção na profundidade de 0-20 cm em função da umidade volumétrica estimada pelo modelo de VAN GENUCHTEN, a partir do software RStudio.

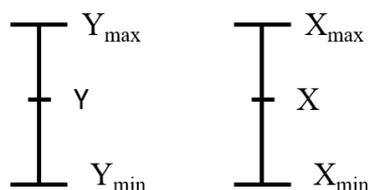


Fonte: elaborado pelo autor.

A umidade volumétrica adequou-se a um modelo linear, com coeficiente de determinação  $R^2$  de 99,27%, indicando que apenas 0,73% da umidade volumétrica calculada não é explicada pela variação da umidade volumétrica estimada pelo modelo de Van Genuchten (1980), na profundidade de 0-20 cm. Gomes, F. *et al.* (2017), ao calibrar um sensor resistivo modelo HL-69 em um latossolo vermelho distroférico de textura média, utilizou o extrator de Richards e o modelo de Van Genuchten, obtendo um  $R^2$  de 99,47%.

Convertendo-se os valores de conteúdo de água gravimétrico para o conteúdo de água volumétrico (%), calculados para cada canteiro na profundidade de 0-20 cm, através das equações 06 e 08, e configurando o sinal analógico de saída do sensor HD-38 de 0 a 1023 para porcentagem (0-100%), a partir da interpolação (Figura 22) foi possível comparar os resultados da umidade volumétrica calculada na calibração e a umidade medida pelos sensores, e desta maneira obter os gráficos da Figura 23.

Figura 22 – Interpolação da conversão do sinal analógico para porcentagem.

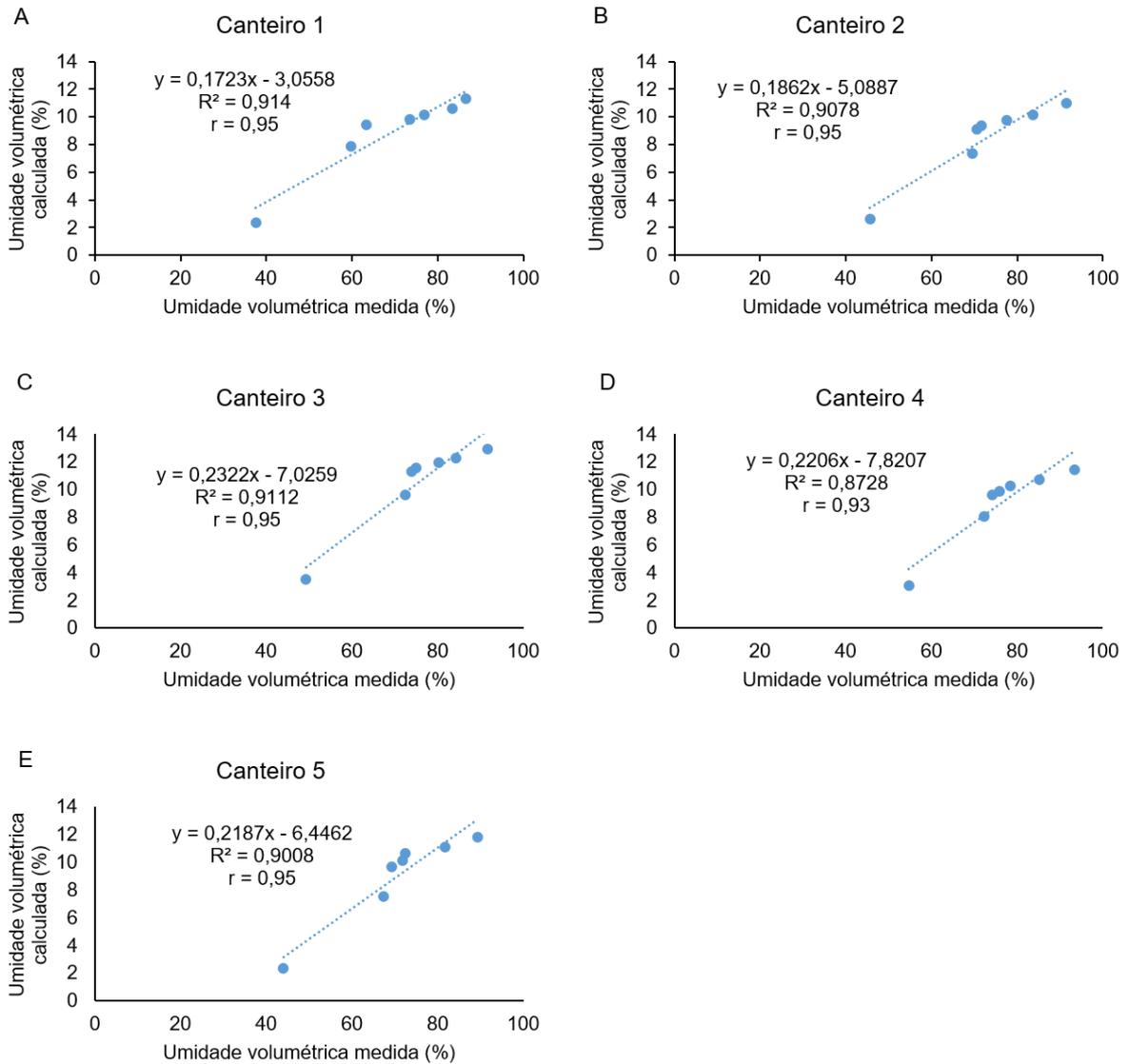


FÓRMULA:

$$\frac{Y - Y_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 23 – Curvas obtidas com as respectivas equações de calibração dos sensores modelo HD-38, para os cinco canteiros na profundidade de 0-20 cm.



Fonte: elaborado pelo autor.

A relação entre a umidade volumétrica calculada (gravimétrica) e a umidade volumétrica medida (sensor HD-38) foi ajustada por uma equação polinomial de segundo grau (quadrática), com elevado grau de ajuste.

Os valores de  $R^2$  obtidos foram de 91% (canteiro 1), 90% (canteiro 2), 91% (canteiro 3), 87% (canteiro 4) e 90% (canteiro 5), considerados elevados, indicando que apenas 9, 10, 9, 13 e 10% da umidade volumétrica calculada para os canteiros de 1 a 5, respectivamente, não são explicadas pela variação da umidade volumétrica medida pelos sensores. Quando esses desvios são comparados ao desvio obtido a partir da equação de Van Genuchten, estes se mostraram poucos inferiores, indicando uma diferença mínima de 8,27% e máxima de 12,27%.

Os resultados obtidos demonstram que houve uma resposta diferente dos sensores para cada canteiro, ou seja, houve uma variação da calibração mesmo sendo um solo de classificação textural semelhante. Além do tipo de solo, outro fator que pode contribuir para essa diferença está relacionado com as diferentes densidades do solo em cada canteiro, e o manuseio do sensor nas amostras. Costa (2014), ao trabalhar com um solo de textura areia franca, observou que houve uma variação do volume de todas as amostras após estas serem acondicionadas no tubo de PVC, alterando, conseqüentemente, os valores de densidade do solo, indicando efeito mecânico de compactação do solo em ocasião da montagem do sistema de calibração.

O sensor HD-38 apresentou uma resposta bastante satisfatória à variação da umidade, em todos os canteiros, principalmente nos canteiros 1 e 4, comprovando, assim, que o sensor apresenta um bom desempenho no solo que foi calibrado. Desta maneira, pode-se utilizar apenas um sensor para abrangência da área que foi calibrado, tomando como referência a área do experimento, diminuindo o custo na aquisição de mais sensores para aplicação. Porém, para acompanhamento mais eficaz, recomenda-se utilizar um sensor em cada canteiro.

Costa (2014) avaliou a capacidade preditiva de equações de calibração para um sensor capacitivo IRRIGAP ao medir a umidade de três solos de diferentes texturas, sendo o solo de textura areia franca com coeficientes de determinação de 99% e 99% nas profundidades de 20-30 cm e 50-60 cm, respectivamente, e o solo de textura franco arenosa com o coeficiente de determinação de 99% na profundidade de 60-90cm, obtidos por modelo de regressão quadrática.

Considerando o modelo de regressão quadrática e os valores de  $R^2$  próximos de 1, explicam adequadamente a relação entre as variáveis, indicando que as curvas obtidas se ajustam com exatidão ao conjunto de dados. Sena *et al.* (2020) afirmam que um conjunto de dados se ajusta à reta obtida quando o coeficiente de determinação for próximo a um, aumentando a precisão da estimativa da umidade do solo após a calibração dos sensores.

As calibrações ocorridas nos canteiros 1, 3 e 4, onde se nota  $R^2=98\%$ , indicam que apenas 2% da umidade do solo calculada não são explicadas pela variação da umidade do solo medida com o sensor, assim como o coeficiente de correlação nos canteiros com o “r” acima dos 93%, indicando que apenas 7% da umidade do solo medida não são explicadas pela variação da umidade do solo calculada. Santana, I. *et al.* (2019), ao analisarem o desempenho de dois sensores de baixo custo e um comercial, concluíram que os sensores se mostraram efetivos para a determinação de umidade do solo, apresentando desempenho satisfatório quando

comparado com os sensores capacitivos comerciais e com o tensiômetro, como uma alternativa viável e de baixo custo para o pequeno produtor, obtendo coeficiente de determinação de 0,84 e 0,85 para os sensores de baixo custo e 0,82 para o comercial.

### **5.3 Avaliação do cultivo de alface sob lâminas de irrigação**

#### **5.3.1 Manejo das lâminas de irrigação**

No primeiro ciclo, as lâminas de irrigação aplicadas variaram de 93,33 a 723,59 mm. Sendo calculadas com base na lâmina empregada pela agricultora no canteiro 1, que foi equivalente a 190,84 mm. Durante o ciclo, a precipitação pluviométrica foi de 26,7 mm, prevalecendo as lâminas de irrigação empregadas no período.

Para o segundo ciclo de cultivo, as lâminas de irrigação empregadas foram 40,92 mm, 20,01 mm, 103,15 mm, 155,18 mm e 65,29 mm nos canteiros 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. O índice pluviométrico na região foi de 159,3 mm durante o ciclo, prevalecendo a precipitação. Para a aplicação da lâmina líquida a agricultora foi orientada a irrigar conforme a necessidade hídrica demandada pelo sensor de umidade do solo, informada no display.

À medida que ocorriam as irrigações, era possível realizar o monitoramento da umidade do solo por meio do display (Figura 24), onde pode ser visto os valores de umidade crítica, calculada a partir da calibração do instrumento com os dados de solo, e o valor em percentual equivalente a umidade na capacidade de campo, que tem por objetivo orientar o(a) agricultor(a) no manejo da irrigação.

As variáveis de umidade do solo instantânea ( $\theta\%$ ) e o tempo de irrigação são outras informações possíveis de serem observadas no visor, que tem a intenção de facilitar o manejo da água por produtores rurais irrigantes. Deve-se salientar que, além dos aspectos relacionados a calibração do sensor para cada condição de solo, a determinação do tempo precisa estar relacionada ao número de fitas gotejadores, quantidade de emissores, vazão do emissor e a área do canteiro. O procedimento foi realizado no canteiro 3, conforme a configuração disponível.

Figura 24 – Display com informações para orientar a irrigação. A) Umidade instantânea do solo; B) Vazão na linha de irrigação; C) Volume de água acumulado; D) Tempo de irrigação necessário para atingir a capacidade de campo; E) Umidade na capacidade de campo; F) Umidade crítica.



Fonte: elaborado pelo autor.

### 5.3.2 Primeiro ciclo: decisão da lâmina eficiente

A Tabela 04 apresenta os resultados das variáveis independentes (lâminas) em relação às variáveis de crescimento da alface e suas médias observadas. Pode-se observar que a massa fresca da planta e a massa fresca da parte aérea foram maiores na lâmina de 480 mm (canteiro 3), sendo que a lâmina que mais se aproximou (lâmina 724), obteve um acréscimo de 33,7% (em relação a lâmina), diminuindo as massas em aproximadamente 4,6%. Esse decréscimo pode indicar o estresse hídrico sofrido pela cultura, referenciado na pesquisa de Oh, Carey e Rajashekar (2010) ao afirmarem que expondo a cultura da alface ao excesso hídrico, ocorreu uma redução do crescimento da massa fresca da parte aérea da cultura.

Tabela 04 – Médias para as variáveis de crescimento analisadas: massa fresca da planta (MFP), massa fresca da parte aérea (MFPA) e diâmetro da cabeça de alface (DCA) (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Canteiro	Lâmina (mm)	MFP (g)	MFPA (g)	DCA (cm)
2	93	63,50	60,6	20,13
1	190	97,46	92,97	21,18
5	304	71,54	65,52	19,88
3	480	168,06	161,85	26,46
4	724	160,17	154,53	26,56

Fonte: elaborado pelo autor.

Com as lâminas aplicadas no canteiro 3 e 4 foi possível observar o mesmo diâmetro médio da cabeça da alface, pois mesmo aumentando a lâmina de irrigação, não foi observado um acréscimo no diâmetro da cultura. Ferreira, Campos e Tomazele (2018), consideraram a importância do diâmetro da cabeça da alface para fim comercial, proporcionando melhores vendas. Diante das médias das variáveis de crescimento apresentadas, observou-se que a lâmina 3 apresentou um melhor desempenho em relação ao volume de água empregado e o desenvolvimento da cultura para fins comerciais. Houve o aumento de 60,41% da lâmina em relação àquela empregada pela agricultora (canteiro 1), porém, ao comparar os resultados, verifica-se uma diferença da massa fresca da planta, massa fresca da parte aérea e diâmetro da cabeça da alface de 70,6 g, 68,8g e 5,28 cm, respectivamente, entre os canteiros 1 e 3. Zuffo *et al.* (2016), ao avaliarem o crescimento de quatro cultivares da alface no sul do Piauí, com a alface crespa, obtiveram MFPA de 89,45g e DCA com 14,47 cm.

A análise de variância das variáveis de crescimento da cultura da alface é exibida na Tabela 05. Dentre as variáveis de crescimento, a massa fresca da parte aérea da planta, por se tratar da variável com maior importância comercial (TAVARES, 2016), pode proporcionar aumento na precificação da cultura ou uma maior saída, visto que geralmente as hortaliças folhosas despertam maior interesse no consumidor de acordo com o tamanho aparente. Ficou evidenciado pela ANOVA que os parâmetros avaliados foram significativamente ( $p \leq 0,05$ ) influenciados pelas lâminas de irrigação aplicadas.

Tabela 05 – Análise de variância para as variáveis de crescimento da cultura da alface crespa em função de lâminas de irrigação: massa fresca da planta (MFP), massa fresca da parte aérea (MFPA) e diâmetro da cabeça da alface (DCA) (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Fontes de variação	GL	Quadrado Médio		
		MFP	MFPA	DCA
Bloco	4	92.366157ns	109.203037ns	3,4516ns
Erro1	4	92.366157	109.203037	3,4516
Lâmina	4	12079.523986*	11673.529217*	54,8337*
Erro2	12	384.669	354,110	2,762
Média		112.1514667	107.0968000	24,08
CV 1 (%)		8,57	9,7	7,72
CV 2 (%)		17,49	17,57	6,90

ns: não significativo; \* significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste F; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

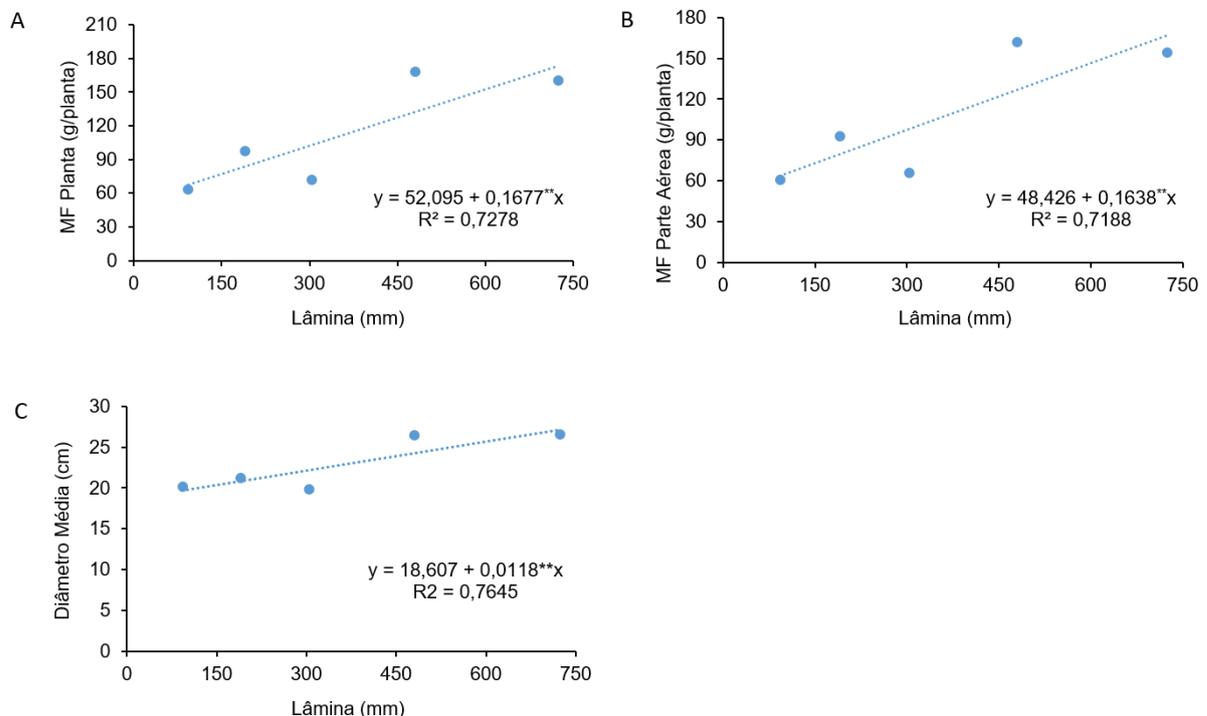
Fonte: elaborado pelo autor.

Silva, C. *et al.* (2020) avaliaram, por meio da biometria e da produtividade, o efeito das lâminas de irrigação aplicadas na cultura da alface em condições de campo e obtiveram efeitos

significativos para massa fresca da planta, diâmetro do caule e massa seca da planta. Leite *et al.* (2022), ao avaliarem o crescimento, desenvolvimento e produtividade da alface em diferentes lâminas de irrigação, observaram que houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) entre as lâminas aplicadas para as variáveis massa fresca da parte aérea, diâmetro da cabeça da alface e massa seca da parte aérea.

Pode-se observar na Figura 25 que todos os parâmetros das variáveis de crescimento avaliados se ajustaram de forma linear com os coeficientes de determinação, os quais explicam que 71,88%, 72,78% e 76,45% da variância dessas variáveis dependem das lâminas aplicadas. Desta forma, vê-se que a alface segue tendência crescente de crescimento de acordo com a lâmina aplicada, estabilizando com uma lâmina entre 450 e 550 mm, sendo que na lâmina de 724 mm houve um decréscimo no desenvolvimento. Foi observado na pesquisa realizada por Leite *et al.* (2022) que ao aumentar a lâmina de irrigação, ocorreu um decréscimo no desenvolvimento da cultura, ocasionado pelo excesso hídrico.

Figura 25 – Variáveis de crescimento: massa fresca da planta (A), massa fresca da parte aérea (B) e diâmetro médio da cabeça (C) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação às variáveis fisiológicas, correspondentes ao índice SPAD, a clorofila e a área foliar da amostra, observa-se um desenvolvimento maior da área foliar da amostra na lâmina de 724 mm (Tabela 06). Observa-se que as médias do índice SPAD e da clorofila foram

semelhantes nos canteiros de lâminas de 480 e 724 mm. Vieira *et al.* (2020) avaliaram o comportamento de parâmetros morfofisiológicos da alface veneranda sob diferentes lâminas de irrigação e fertirrigação e, como resultado, obtiveram uma média entre 16,22 e 21,78 do índice de SPAD. Os autores ainda relataram que a redução da lâmina de irrigação afetou negativamente o índice de clorofila, o que pôde ser observado no presente estudo.

Entretanto, a área foliar da amostra no canteiro 4 foi a variável que apresentou o maior valor observado e que recebeu um maior volume de água, sendo uma diferença de área foliar de 33,70% entre as lâminas de 480 e 724 mm.

Tabela 06 – Médias para as variáveis fisiológicas analisadas: índice SPAD, clorofila (CHL) e área foliar da amostra (AFA) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Canteiro	Lâmina	SPAD	CHL ( $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	AFA ( $\text{cm}^2$ )
2	93	21,43	18,83	218,36
1	190	22,63	19,73	210,84
5	304	21,03	18,73	197,69
3	480	27,66	25,26	272,56
4	724	27,63	25,5	290,99

Fonte: elaborado pelo autor.

Observa-se na Tabela 07 que a cultura da alface respondeu significativamente aos níveis de SPAD, clorofila e área foliar da amostra, além do baixo coeficiente de variação 1, sendo os dados de área foliar da amostra mais homogêneos em relação às lâminas. Com o objetivo de avaliar o efeito das diferentes lâminas de irrigação no desempenho agrônômico e rendimento da alface, Silva, C. (2019) observou efeitos significativos entre as variáveis índice de SPAD e área foliar da amostra com as diferentes lâminas de irrigação, em experimento realizado no campo e em ambiente protegido.

Tabela 07 – Análise de variância para as variáveis fisiológicas da cultura da alface crespa em função de lâminas de irrigação: soil plant analyses development index (SPAD), clorofila (CHL) e área foliar da amostra (AFA) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

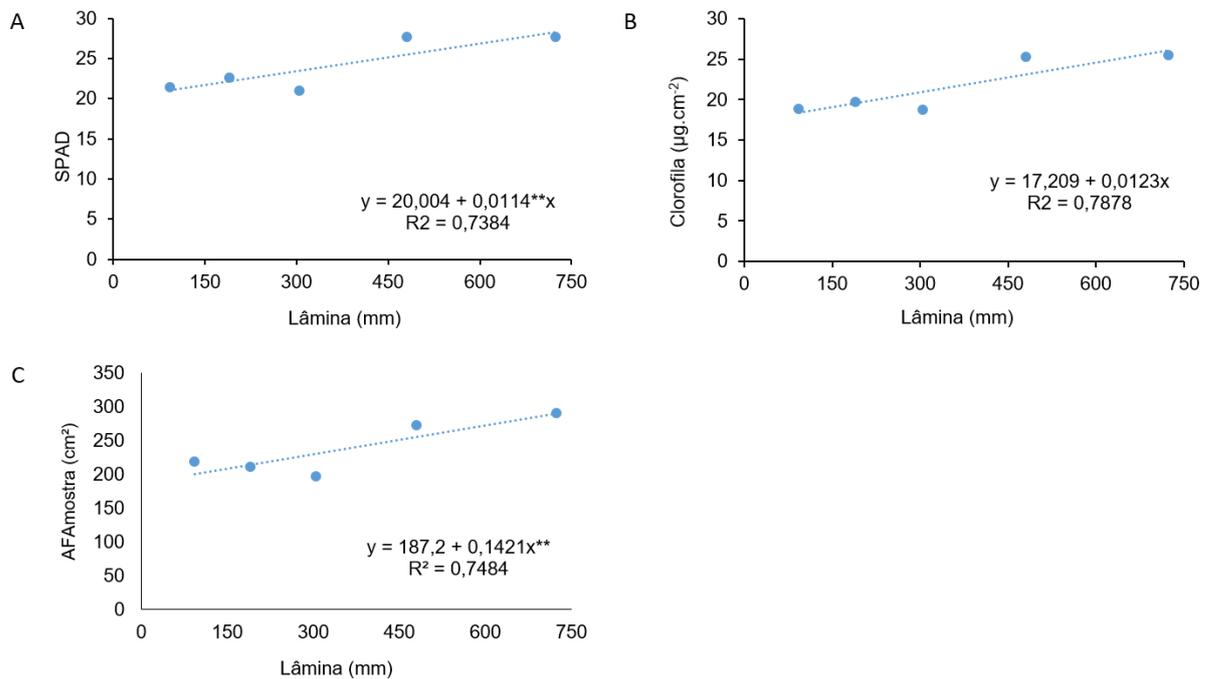
Fontes de variação	GL	Quadrado Médio		
		SPAD	CHL	AFA
Bloco	4	3.451667ns	1.537778ns	162,16ns
Erro 1	4	3.451667	1.537778	165,16
Lâmina	4	54.837778*	60.012778*	8437,24*
Erro 2	12	2,762	4,49	713,86
Média	-	24.0800000	21.6133333	436336,58
CV 1	-	7,72	5,74	5,40
CV 2	-	6,90	9,81	11,22

ns: não significativo; \* significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste F; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se, através da análise de regressão linear (Figura 26), um decréscimo nas variáveis da lâmina de 304 mm, contrariando Santos, P. *et al.* (2020), que constataram um aumento da área foliar com o aumento da lâmina de irrigação, porém, identificaram uma diminuição nos dias que não ocorreram irrigação, visto que as folhas são importantes para a realização da fotossíntese, que favorece aos ganhos de produtividade.

Figura 26 – Variáveis fisiológicas: Índice SPAD (A), clorofila (B), área foliar da amostra (C) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

Sobre a clorofila, Winder (2018) afirma que o baixo teor de clorofila é um indicativo da deficiência de nitrogênio. Considerando que o canteiro 5 (lâmina 304) estava posicionado em uma área mais inclinada do terreno e ter sido manejado uma semana após os demais, de forma manual, podendo ter sido aplicadas doses distintas de nutrientes. A agricultora trabalha com a agricultura orgânica e se utiliza de material vegetal disponível no próprio local do experimento, como cascas e troncos de plantas, além de esterco bovino curtido.

Bem como, o decréscimo nas variáveis do canteiro 5 (lâmina 304 mm) pode-se justificar devido ao estresse hídrico sofrido pela cultura, acarretado por chuvas e as demais lâminas lixiviando os nutrientes. Moline *et al.* (2015), ao observarem o desenvolvimento da cultura da

alface em função da lâmina aplicada, notaram que o estresse hídrico deficitário, tanto quanto excedente, promoveram menores valores de produtividade comercial na alface.

Na Tabela 08 é possível observar que as maiores médias das variáveis de produção foram obtidas a partir da lâmina de 480 mm, com exceção da MSC reduzida em 4,8% em relação a lâmina de 724 mm. Ainda assim, considerando que o número de folhas é uma característica importante para avaliação, principalmente em razão da alface ser uma hortaliça folhosa, cujas folhas constituem a parte comercial, Santana, J. *et al.* (2019) observaram através da análise dos dados as plantas que atingiram a maior quantidade de folhas foram aquelas que receberam uma maior lâmina de irrigação, correspondentes a 100 e 125% da  $ET_0$ .

Tabela 08 – Médias para as variáveis de produção analisadas: massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Canteiro	Lâmina	MSR (g)	MSC (g)	MSPA (g)	DC (mm)	NF (un)
<b>2</b>	93	0,28	0,34	3,10	12,55	12,86
<b>1</b>	190	0,48	0,69	3,80	14,89	18,33
<b>5</b>	304	0,31	0,44	3,10	11,84	14,06
<b>3</b>	480	0,60	0,99	5,36	19,09	18,93
<b>4</b>	724	0,56	1,04	5,20	18,796	18,66

Fonte: elaborado pelo autor.

No presente estudo, com o aumento das lâminas de irrigação ocorreu o aumento do número de folhas, estabilizando com as lâminas de 480 e 724 mm. Resultado semelhante foi obtido por Vieira *et al.* (2020) que ao aumentarem a lâmina de irrigação, concomitante ao NPK, observaram o aumento gradativo no número de folhas atingindo cerca de 14 unidades com o nível máximo de fertirrigação empregada. Leite *et al.* (2022), ao avaliarem o crescimento, desenvolvimento e produtividade da alface em diferentes lâminas de irrigação, observaram que houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) entre as lâminas aplicadas para a variável massa seca da parte aérea.

Em relação à análise de variância (Tabela 09), todas as variáveis foram significativas em relação às lâminas aplicadas e uma forte influência nas variáveis de produção, principalmente no número de folhas por influenciar na escolha do produto pelo consumidor (MILHOMENS *et al.*, 2015). Silva, C. *et al.* (2020) apresentaram resultados significativos na interação entre as lâminas de irrigação empregadas e as variáveis diâmetro do caule e número de folhas.

Tabela 09 – Análise de variância para as variáveis de produção da cultura da alface crespa em função de lâminas de irrigação: massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca das folhas (MSF), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Fontes de variação	GL	Quadrado Médio				
		MSR	MSC	MSF	DC	NF
Bloco	4	0.003184ns	0.007326ns	0.1225ns	1.038662ns	2.317778ns
Erro1	4	0.003184	0.007326	0.1225	1.038662	2.317778
Lâmina	4	0.103405*	0.490861*	3,888*	57.739010*	41.340000*
Erro2	12	0,0113	0,021	0,420	2,1175	3,11
Média	-	0,45	0.7073333	3,094	15.4354667	16.5733333
CV1		12,51	12,10	11,31	6,60	9,19
CV2	-	23,58	20,93	20,96	9,43	10,64

ns: não significativo; \* significativo a 0,05 de probabilidade pelo teste F; GL: grau de liberdade; CV: coeficiente de variação.

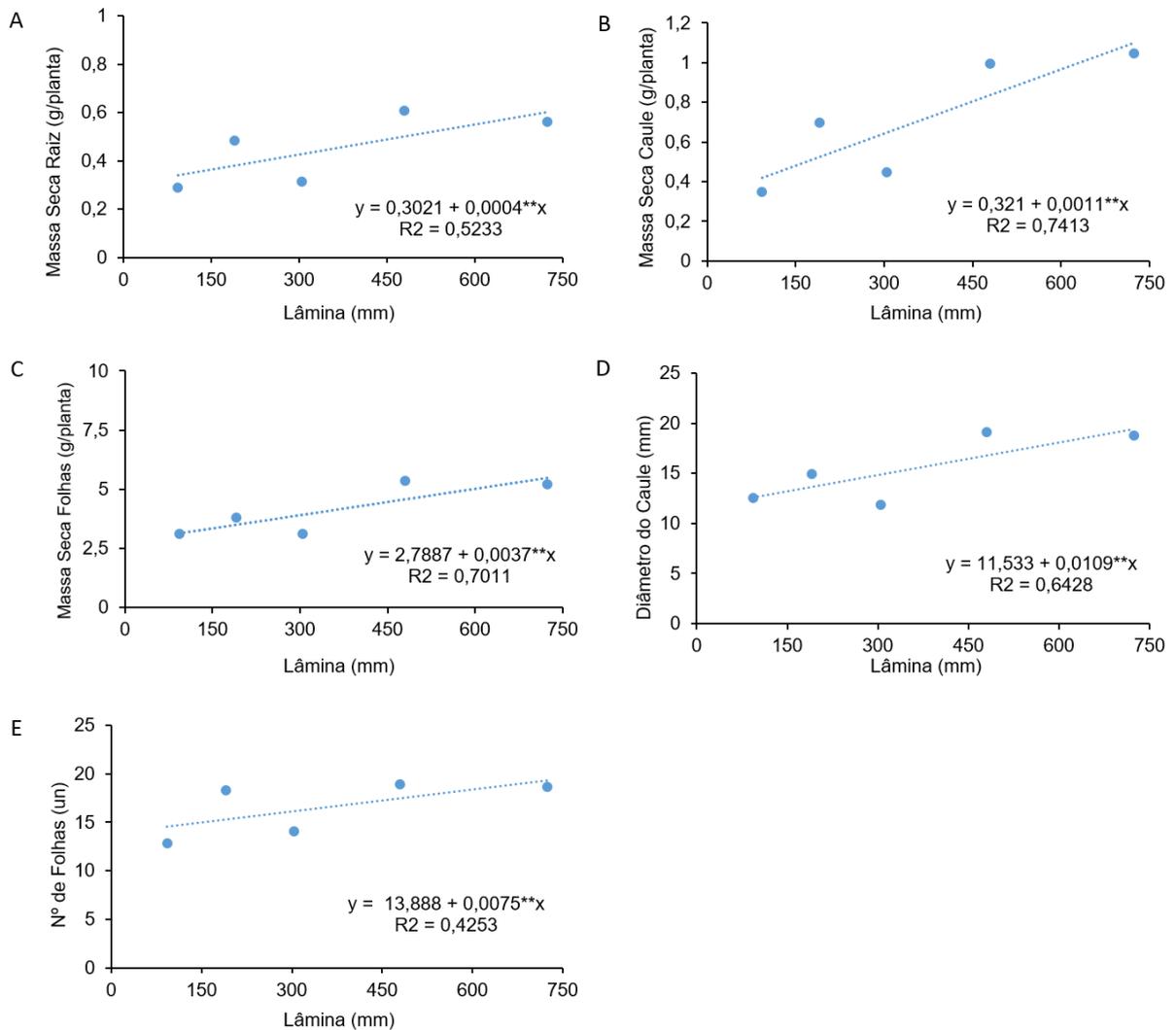
Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se, através da análise de regressão linear (Figura 27), que houve um acréscimo na produção para cada variável analisada de acordo com as diferentes lâminas de irrigação. As lâminas de 724 e 480 mm obtiveram o mesmo número de folhas, com uma média de 18 folhas por planta. Silva, J. *et al.* (2017), ao avaliarem a massa seca da raiz da alface em diferentes lâminas de irrigação, observaram um efeito significativo e um comportamento linear crescente, com o aumento das lâminas aplicadas.

Considerando o cunho comercial da alface e a variável de produção número de folhas, Magalhães *et al.* (2015) e Araújo *et al.* (2010) obtiveram entre 16 e 19 folhas por planta, respectivamente. Estes últimos verificaram o efeito linear e crescente dessa variável em função do aumento da lâmina de irrigação, onde aplicaram doses entre 20 e 120% da evapotranspiração e obtiveram resposta linear. Santana, J. *et al.* (2019) também observaram o efeito linear e crescente do número de folhas em função do aumento das lâminas de irrigação, correspondentes a 100% e 125% da  $ET_0$ .

A aplicação de diferentes lâminas de irrigação respondeu significativamente ao crescimento da alface no município de Nossa Senhora da Glória, SE. O principal resultado é que a alta produtividade da alface está relacionada às lâminas aplicadas, assim, a definição de uma lâmina específica permitirá à agricultora obter um valor agregado ou maior saída do produto no mercado, sendo necessário acrescentar 60,41% à sua lâmina de referência (190 mm), ou seja, a aplicação da lâmina 4.

Figura 27 – Variáveis de produção: Massa seca da raiz (A), massa seca do caule (B), massa seca das folhas (C), diâmetro do caule (D) e número de folhas (E) de plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.



Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se que diante dos aspectos quantitativos apresentados e a lâmina aplicada, o canteiro 3 (lâmina 4), superou os demais canteiros, principalmente nos aspectos de maior importância comercial, como o número de folhas, massa fresca da parte aérea e o diâmetro da cabeça da alface.

### 5.3.3 Segundo ciclo: validação do sistema de monitoramento da umidade do solo

Considerando que a lâmina eficiente foi a aplicada no canteiro 3, correspondente a lâmina de 480 mm no primeiro ciclo, ou 125% da recomendação da produtora durante o primeiro ciclo, o sensor de umidade foi mantido instalado no mesmo canteiro durante o segundo

ciclo, orientando a irrigação a ser efetuada pela agricultora, baseada na umidade do solo demandada pelo sensor.

A validação do uso do sistema, então, foi feita a partir de aspectos quantitativos das variáveis da cultura da alface e relacionados com o manejo da irrigação a partir do sensor de umidade do solo. Considerando que a alface produzida pela agricultora é vendida, preferencialmente, em feiras livres e diretamente ao consumidor final, as variáveis analisadas foram baseadas nas informações publicadas pelo CEPEA-ESALQ/USP (2016), que informa não haver um padrão no mercado para aquisição da cultura, somente uma separação da mercadoria baseada no interesse dos comerciantes/fornecedores que separam as alfaces pelos tamanhos, comercializando as menores em supermercados, e as maiores, direcionadas às feiras livres. Assim, as variáveis avaliadas foram relacionadas ao tamanho, como a massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar da amostra (AFA), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), como as variáveis de produção.

A Tabela 10 contém os valores das variáveis de produção no canteiro que recebeu a lâmina equivalente a 190 mm (canteiro 1), que considerou 100% do manejo da produtora, e do canteiro 3, que recebeu a lâmina de 480 mm no primeiro ciclo (lâmina eficiente) e 262 mm no segundo ciclo (manejo com o sensor). Percebeu-se que as variáveis de crescimento da alface irrigada com 480 mm e 262 mm foram superiores às observadas nas plantas irrigadas com a lâmina de 190 mm. A lâmina habitualmente empregada pela agricultora (190 mm), apresentou uma redução de 27,48% da lâmina aplicada a partir do sensor de umidade do solo, conseqüentemente, obtendo uma redução nas variáveis agronômicas da cultura.

Tabela 10 – Médias para as variáveis analisadas: lâmina de irrigação, massa fresca da parte aérea (MFPA), área foliar da amostra (AFA), diâmetro do caule (DC) e número de folhas (NF) por planta de alface (*Lactuca sativa* L.) em função de lâminas de irrigação empregadas no primeiro e segundo ciclo de cultivo. Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Canteiro	Ciclo	Lâmina (mm)	MFPA (g)	AFA (cm <sup>2</sup> )	DC (mm)	NF (un)
<b>1</b>	Primeiro	190	92,97	210,84	14,89	18,33
<b>3</b>	Primeiro	480	161,85	272,56	19,09	18,93
<b>3</b>	Segundo	262	145,43	181,49	18,69	24,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que concerne à irrigação empregada a partir das informações do sensor de umidade do solo, esta ocorreu de maneira favorável apenas em relação ao número de folhas, entre as variáveis analisadas. Porém, ao considerar o número de folhas como um dos principais aspectos comerciais da alface, por ser uma hortaliça folhosa (Santana, J. *et al.*, 2019), percebeu-se uma

diferença de 25,48%, em relação a lâmina empregada pela agricultora, favorecendo a lâmina aplicada a partir do sensor de umidade do solo.

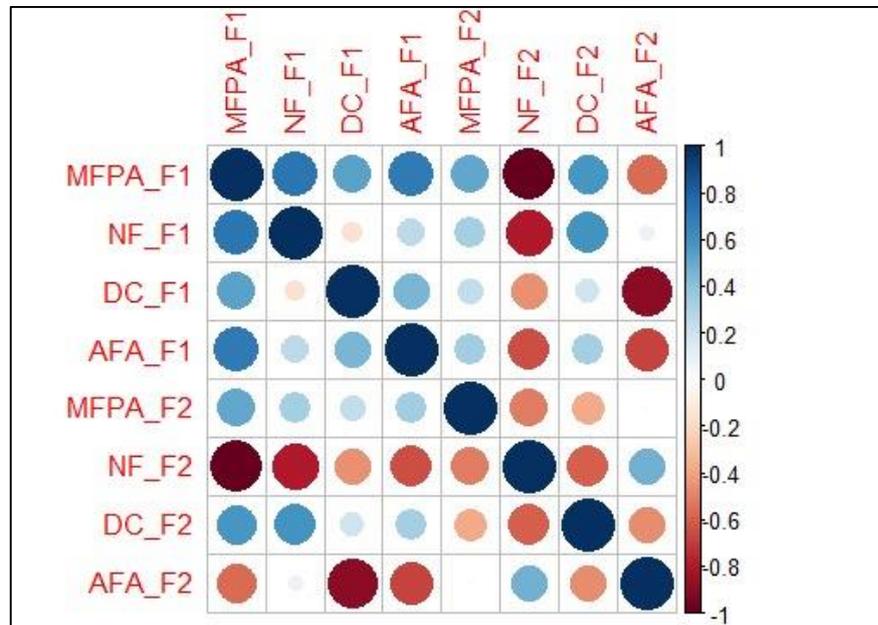
A lâmina de irrigação, quando empregada com a finalidade de atender a demanda hídrica necessária da cultura, torna-se favorável para o seu desenvolvimento, porém, outros fatores também podem influenciar, a exemplo do nitrogênio. O primeiro ciclo apresentou melhores resultados para as variáveis MFPA, AFA e DC, todos referentes a lâmina eficiente. O fato de que o segundo ciclo ocorreu no período com maior índice pluviométrico pode ter contribuído para a lixiviação dos nutrientes, favorecendo o decréscimo das variáveis MFPA, AFA e DC, quando realizado o manejo com o sensor.

Santana, J. *et al.* (2019) afirmam que o nitrogênio é o nutriente mais importante para a alface e o seu excesso ou deficiência pode ocasionar quedas na produção e baixo desenvolvimento da cultura. Por esta razão, a cultura da alface requer uma adubação mais cautelosa, principalmente na fase final do ciclo, pois é o período em que a planta absorve mais os nutrientes (MOTA *et al.*, 2016). No segundo ciclo de cultivo as chuvas ocorreram em maior abundância e frequência na fase final (Figura 12).

Considerando que a variável número de folhas é uma característica importante para avaliação, esse fator contribui para a definição desta lâmina (262 mm) ser também uma referência para aplicação na área do experimento.

A Figura 28 mostra a análise de correlação de Pearson para as variáveis de produção da alface entre o primeiro e o segundo ciclo. Para o primeiro ciclo, a referência foi a lâmina de 480 mm (canteiro 3), por ter proporcionado a maior produção. Para o segundo ciclo, quando foram empregados os sensores de umidade do solo, foi tomado como referência também o canteiro 3, para fins de comparação. Podem ser observadas correlações positivas e preditivas entre as variáveis do primeiro ciclo (MFPA\_F1, NF\_F1, DC\_F1 e AFA\_F1). Quando estas são correlacionadas com as variáveis do segundo ciclo, apresentaram correlações positivas com a massa (MFPA\_F2) e com o diâmetro do caule (DC\_F2).

Figura 28 – Matriz de correlação de Pearson a partir das variáveis de produção da alface quando irrigada com a lâmina de 480 mm no primeiro ciclo e quando irrigada com a lâmina obtida no manejo com os sensores no segundo ciclo. Nossa Senhora da Glória, 2022.



MFPA: massa fresca da parte aérea; NF: número de folhas; DC: diâmetro do caule; AFA: área foliar da amostra; F1: primeiro ciclo; F2: segundo ciclo.

Fonte: elaborado pelo autor, utilizando o software @RStudio, através da Linguagem de Programação R.

No segundo ciclo, o número de folhas (NF\_F2) e a área foliar (AFA\_F2) apresentaram correlação negativa, preditiva e significativa com a produção em massa da alface (MFPA) nos dois ciclos, permitindo inferir de que a massa foi inversamente proporcional ao número de folhas e área foliar. Porém, como no segundo ciclo houve maior taxa de precipitação e, ainda, uma menor radiação, pode ter ocorrido maior expansão celular, permitindo aumentar o crescimento em número de folhas e em área foliar, não sendo refletida em aumento de massa.

#### 5.3.4 Estimativa do volume de água empregada

Contabilizar o consumo de água durante a produção da cultura é primordial, visto seu custo operacional, financeiro e ambiental. Assim, foram avaliados o consumo de água durante cada ciclo e a aferição em relação as lâminas aplicadas e ao volume acumulado contabilizado pelo sensor de vazão/volume.

Desta maneira, na Tabela 11, pode-se perceber que a lâmina de 480 mm, definida como a que obteve o melhor resultado em relação as variáveis de crescimento, produção e fisiológica,

ocorreu um consumo 60,32% superior à lâmina empregada pela agricultora. No segundo ciclo, o volume empregado foi o da irrigação, acrescido da precipitação, totalizando 2624 litros no ciclo, ou seja, um aumento de 27,28% em relação ao volume aplicado pela agricultora no primeiro ciclo. Entretanto, apesar desse aumento, a partir da demanda definida pelo sensor de umidade do solo, observou-se um aumento de 25,48% no número de folhas.

Devido ao sensor de vazão/volume estar instalado em uma bifurcação em “Y”, conectado a duas fitas gotejadoras, contabilizou-se somente o volume acumulado nessa faixa, sendo necessário multiplicar pelo número de bifurcações existentes no canteiro, para então contabilizar o volume de água aplicada em todo o canteiro, o que gerou um volume acumulado no segundo ciclo de 1018 litros de água. Quando comparado com a lâmina de irrigação empregada no segundo ciclo, desconsiderando a precipitação, o sistema apresentou um erro de 1,26%, ou seja, dentro da faixa recomendada pelo fabricante, que é de  $\pm 10\%$ .

Tabela 11 – Consumo de água durante os ciclos de cultivo da alface (*Lactuca sativa* L.). Nossa Senhora da Glória, SE. 2022.

Ciclo	Canteiro	Lâmina (mm)	Volume (L por canteiro)	Evento
<b>Primeiro</b>	1	190	1908	Irrigação
<b>Primeiro</b>	3	480	4809	Irrigação
<b>Segundo</b>	3	103	1031	Irrigação
<b>Segundo</b>	3	159	1593	Precipitação
<b>Segundo</b>	3	-	1018	Sensor

Fonte: elaborado pelo autor.

Desta maneira, observa-se que houve maior consumo de água em relação ao volume empregado pela agricultora, porém, notou-se que as variáveis da cultura apresentaram um melhor resultado voltado ao aspecto comercial. Sendo assim, recomenda-se o acompanhamento de funcionamento do equipamento para o manejo da irrigação no período de estiagem para um melhor controle da irrigação e menor interferência da precipitação efetiva.

#### 5.4 Custo para implementação do sistema de monitoramento de umidade do solo

O investimento para montagem dos sistemas (Tabela 12) foi precificado na finalização do projeto (julho/2022), considerando que houveram aumentos expressivos na aquisição de componentes eletrônicos, decorrentes da pandemia iniciada no ano de 2020. Sendo assim, é

possível adquirir os componentes facilmente no comércio do estado de Sergipe, podendo obter uma redução nos custos ao adquiri-los no comércio nacional ou mesmo internacional, reduzindo os custos financeiros, porém, com o aumento do prazo de entrega, podendo atingir 60 dias corridos. Os valores podem variar de acordo com o custo de envio para cada região e a quantidade de instrumentos, caso seja preferível instalar um sensor de umidade do solo em cada canteiro, por exemplo.

Tabela 12 – Investimento para aquisição do sistema de instrumentação agrícola para condução da irrigação na cultura da alface, na região do semiárido, município de Nossa Senhora da Glória, SE, 2022.

Componente	Qty.	Investimento (R\$)		
		Comércio Local	Comércio Nacional	Comércio Internacional
<b>Microcontrolador Arduino UNO</b>	01	119,90	99,90	46,27
<b>Tela de LCD 20x4</b>	01	40,00	39,00	13,91
<b>Sensor de umidade do solo</b>	01	85,90	112,70	14,84
<b>Sensor de vazão e volume</b>	01	30,00	24,51	11,23
<b>Regulador De Tensão Step-down Lm2596</b>	01	36,90	29,30	5,38
<b>Fonte de alimentação 12v</b>	01	18,00	14,49	12,27
<b>Placa pcb 5x7cm</b>	01	7,00	7,00	5,53
Investimento total		<b>337,7</b>	<b>326,9</b>	<b>109,43</b>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns acessórios são necessários para a montagem e instalação dos equipamentos como ferro de solda, solda de estanho, chave de fenda, alicate de corte, entre outros. Sugere-se que o microcontrolador seja instalado em um local protegido das intempéries ou em caixas específicas de painéis de comando, aumentando o custo da implementação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das condições em que esta pesquisa foi conduzida e dos resultados obtidos, podem ser feitas as considerações abaixo.

Sobre o sistema:

O sistema de gerenciamento e acompanhamento de dados, desenvolvido para o manejo da irrigação no cultivo da alface, conseguiu atender os objetivos ao monitorar as variáveis de umidade do solo, volume acumulado e o funcionamento da rede (*scan*) com o protocolo de rede Modbus RTU, na camada física RS-485. Em conjunto com o sistema SCADA, possibilitou maior organização e tratamento dos dados através de análises e comparações gráficas. O sistema apresenta várias telas que tornam possível consultar históricos dos dados coletados ou consultar a situação em tempo real, diretamente no próprio sistema.

Os equipamentos mestre e escravo mostraram-se bastante eficazes nas aquisições e transmissão dos dados, o Arduino Mega, como escravo, é responsável pelo processamento dos dados recebidos dos instrumentos instalados em campo, apresentou-se como equipamento de fácil utilização tanto da plataforma do software quanto do hardware, ofertando condições necessárias para a execução da aplicação. O SCADA, como mestre, recebeu e transmitiu os dados em um par de fio trançado, o qual recebeu os sinais da rede RS-485 utilizando os dispositivos conversores USB/RS-485, conectado ao computador, e o RS-485/ TTL, conectado ao dispositivo escravo, garantindo conversão e a confiabilidade da informação, além do regulador de tensão mantendo uma tensão constante durante a aplicação, mostraram-se bastante estáveis.

O protocolo Modbus RTU utilizado em conjunto com a rede RS-485 mostrou elevada segurança nas transmissões dos dados. As mensagens Modbus RTU foram transmitidas com sucesso, podendo ser monitoradas pelo sistema supervisor em tempo real, permitindo a realização de diagnósticos de problemas em tempo bastante reduzido.

Sobre a calibração:

Utilizando-se das equações para calibração obtidas neste estudo com o sensor HD-38, obteve-se a umidade do solo de forma satisfatória a partir de modelos polinomiais, apresentando um desempenho aceitável para a estimativa da umidade em solo de textura areia franca com o uso do sensor resistivo.

Os modelos quadráticos obtidos para a estimativa da umidade em solos da região (na profundidade de 0-20 cm) foram considerados significativos ao nível de 95% de probabilidade, representando adequadamente a relação entre as variáveis umidade do solo (em  $m^3m^{-3}$ ) e a resposta do sensor resistivo, em termos de sinal analógico de saída. Os valores do coeficiente de determinação  $r^2$  demonstraram que grande parte da variação da umidade do solo pode ser explicada pela variação na resposta do sensor resistivo utilizado.

Dentre os sensores, o que estava localizado no canteiro 3 – definido como o foco da pesquisa a partir dos resultados agronômicos – mostrou-se efetivo para a determinação de umidade do solo, apresentando um desempenho satisfatório, sendo uma alternativa viável e de baixo custo para o pequeno produtor.

Sobre a avaliação do sistema:

A cultura da Alface respondeu significativamente a todas as lâminas aplicadas no primeiro ciclo, sendo a lâmina de 480 mm a que apresentou os melhores resultados para as variáveis analisadas: massa fresca da planta, massa fresca da parte aérea, diâmetro da cabeça da alface, índice SPAD, clorofila, massa seca da raiz, massa seca da parte aérea, diâmetro do caule e número de folhas.

No segundo ciclo, a aplicação da lâmina líquida, conforme a necessidade hídrica demandada pelo sensor de umidade do solo, foi de fácil entendimento e interpretação, visto que a agricultora irrigou satisfatoriamente, conforme a informação contida no display instalado no campo.

Ao comparar o consumo de água utilizado pela agricultora – com base em seu conhecimento empírico – e o consumo quando seguidas as orientações dadas pelo dispositivo, houve maior consumo nesta segunda situação. No entanto, ocorreu aumento significativo no número de folhas por planta, sendo esta uma das principais características comerciais da alface. Na lâmina aplicada através do senso comum (190 mm), obteve-se uma área foliar maior, sendo outra característica comercial importante para a cultura da alface. Diante disso, sugere-se que o dispositivo seja utilizado no período de estiagem para ter o melhor controle da umidade do solo em relação à precipitação.

Recomenda-se o uso do dispositivo para manter algum controle, sendo que a irrigação orientada pelas informações no display também reflete na sustentabilidade local, pois ao manter a irrigação abaixo da capacidade de campo, evita a saturação do solo e a lixiviação dos

nutrientes na sua composição, o que torna o solo infértil e desertificado ao longo do tempo, sendo favorecido ainda pelo clima e solo local.

Economicamente, o dispositivo orientativo ao manejo racional da irrigação é de baixo custo, se comparado a outras tecnologias, e de fácil aquisição, estando disponível no comércio local, nacional e internacional.

Socialmente, o dispositivo promove melhorias nas condições de vida do agricultor, direcionando-o ao planejamento das atividades no campo, o que dará discernimento sobre o momento exato para efetuar a irrigação, podendo direcionar a força de trabalho para outras atividades.

Sugere-se que o dispositivo possa ser empregado e avaliado em outros tipos de solo e condições climáticas, para obtenção da umidade do solo em tempo real e informar a lâmina diária necessária, com automatização da irrigação. Outro fator é o uso de tecnologias sem fio *long range*, a exemplo do protocolo LoRaWAN.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 528p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. 300p.
- ALMEIDA, P.; BONOMO, R.; SILVA, F. O.; BARROCA, M. V.; SOUZA, J. M. Calibração de Sonda TDR e desempenho de Modelos para determinação de umidade em argissolo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. 2018. DOI: 2468-2476. 10.7127/rbaiiv12n200756.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, M. E. B.; AUGUSTO, V. A. Certificação na agricultura irrigada como incentivo ao uso racional e eficiente da água. *In*: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (Orgs.) **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: história, política pública, economia e recurso hídrico** [recurso eletrônico]. Piracicaba: ESALQ - USP, 2021. 574 p.: il. (Cátedra Luiz de Queiroz)
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual de usos consultivos da água no Brasil**. Brasília: 2019. Disponível em: [http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana\\_manual\\_de\\_usos\\_consultivos\\_da\\_agua\\_no\\_brasil.pdf/view](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consultivos_da_agua_no_brasil.pdf/view). Acesso em: 15 jan. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília, 2021a 2. ed. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br/>. Acesso em 21 jan. 2022.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: usos da água**. Brasil: 2021b. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/usos-da-agua>. Acesso em: 19 dez. 2021.
- ANJOS, G. H. A.; CESTARI, Y. A. **Controle de irrigação usando inversor de frequência em rede modbus**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica. 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/261> Acesso em 20 Jan. 2022.
- ANTONINI, R. C.; BORTOLOTTI, R. P.; ZAMBERLAN, J. F.; DALLA NORA, D.; PASINI, M. P. B.; FIORIN, J. E. Adoção e uso da agricultura de precisão na região das missões do Rio Grande do Sul. **Holos**, Ano 34, v. 4, p. 106-121, 2018. ISSN 1807-1600. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2018.6297>.
- ANTUNES JÚNIOR, E. J.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo EC-5 em um latossolo em função da densidade do solo. **Revista Engenharia na**

**Agricultura** – Reveng, v. 26, n. 1, p. 80-88, 2018. DOI: <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.864>.

ARAÚJO, W. F.; SOUZA, K. T. S.; VIANA, T. V. A.; AZEVEDO, B. M.; OLIVEIRA, G. A. Rendimento e eficiência do uso da água pela alface em função da lâmina de irrigação. **Revista Caatinga**, v.23, p.115-120, 2010. Disponível em: <https://rbmv.org/index.php/caatinga/article/view/1824>

AXELSON, J. Designing RS-485 circuits. **Circuit Cellar**, v. 107, p. 20-24, 1999.

BAGGIO, C. A.; KUHL, M. R. Determinants in value appropriation in smallholder farming innovations. **Cienc. Rural**. Santa Maria, v. 48, n. 3, e20170291, 2018. Epub Mar 26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170291>.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9ª ed. Viçosa: UFV, 2019. 545 p.

BEZERRA, A.C. M.; VALENÇA, D. C.; CARVALHO, D. F.; PINHO, C. F.; REINERT, F.; GOMES, D. P.; GABETTO, F. P.; AZEVEDO, R. A.; MASSERONI, D.; MEDICI, L. O. Automation of lettuce seedlings irrigation with sensors deployed in the substrate or at the atmosphere. **Sci. agric.**, v. 76, n. 2, p. 179-189, Mar./Abr., 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0163>.

BOUYOUCOS, G. J. Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analysis of Soils. **Agronomy Journal**, 54, 464-465, 1962. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

BRAGA, M. B.; GUEDES, I. M. R.; SILVA, J.; LIMA, C. E. P. **Determinação simplificada da umidade do solo visando o manejo de irrigação em hortaliças**. 2018 - Brasília, DF: Embrapa Hortaliças.

BRASIL. **Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006**. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Brasília, DF: Presidência da República, [2006]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2006/Lei/L11326.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11326.htm). Acesso em: 10 set. 2020.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Conselho Deliberativo. **Resolução nº 107, de 27 de julho de 2017**. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19287874/do1-2017-09-13-resolucao-n-107-de-27-de-julho-de-2017-19287788](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19287874/do1-2017-09-13-resolucao-n-107-de-27-de-julho-de-2017-19287788). Acesso em: 20 ago. 2020.

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online]. 2011, v. 35, n. 6, pp. 1939-1948. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600010>.

CARVALHO, H. B. **Automação como suporte à otimização do uso de água e energia na cultura do coco irrigado no município de Neópolis-SE**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Programa Regional de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2011. Disponível em: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/4095>. Acesso em: 15 Dez. 2020.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Agricultura familiar**. 2017. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/agricultura-familiar>. Acesso em: 25 Jan. 2021.

CUNHA, M. M. **Desenvolvimento de um sistema embarcado para realização de manejo de irrigação**. 2019. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

CEPEA-Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - ESALQ/USP. Padronização dos HFS. **Hortifrutí Brasil**, Ano 15 - Nº160, Setembro, 2016. ISSN: 1981-1837. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/acessar/completo/padronizacao-dos-hfs.aspx>. Acesso em 20 Jun. 2022.

COSTA, B. R. S. **Calibração de sensor de capacitância para medida da umidade em solos do semiárido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2014. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/ppgea/pesquisa/publicacoes-1/arquivos/bruno-ricardo-silva-costa.pdf>. Acesso em 23 Jan. 2022.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 2003. 3ª Edição, São Paulo. Editora Blucher. 366p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.

DINIZ, J. V.; TEIXEIRA, A. D.; ALBIERO, D.; PONTES, A. T. A. C.; SOARES, F. A. X. Avaliação do sensor fluxo de água para aplicação de fertilizante líquido, utilizando placa microcontroladora arduino. XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017. **Anais...**, 2017.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Necessidades Hídricas das Culturas**. 5 ed, Roma: FAO, 1977. 204 p. (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 24).

DOURADO NETO, D.; PAOLINELLI, A.; MANTOVANI, E. C. A irrigação no Brasil: sua importância em normas, princípios legais e breve retrospectiva histórico-legislativa. *In*: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (Orgs.) **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil**: história, política pública, economia e recurso hídrico [recurso eletrônico]. Piracicaba: ESALQ - USP, 2021. 574 p.: il. (Cátedra Luiz de Queiroz)

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo** / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

FACCIOLI, G. G.; GOMES FILHO, R. R. Índice de sustentabilidade: contribuições das ciências ambientais na agricultura irrigada. *In*: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (Orgs.) **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: história, política pública, economia e recurso hídrico** [recurso eletrônico]. Piracicaba: ESALQ - USP, 2021. 574 p.: il. (Cátedra Luiz de Queiroz)

© FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Family farmers: feeding the world, caring for the earth.** Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2014. Roma, p. 4. Disponível em: <http://www.fao.org/3/mj760e/mj760e.pdf>. Acesso em: 20 Ago. 2020.

© FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Agricultura irrigada sustentável no brasil.** 2017. p.18-19. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i7251o.pdf>. Acesso em: 10 Out. 2020.

© FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. **Agricultura Mundial Rumo a 2030/2050: a revisão de 2012.** 2012. Disponível em: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/esag/docs/AT2050\\_revision\\_summary.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/esag/docs/AT2050_revision_summary.pdf). Acesso em: 10 Jul. 2021.

FAO e IFAD. **United nations decade of family farming 2019-2028.** Global Action Plan. Roma. 2019. Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca4672en/ca4672en.pdf>. Acesso em: 02 Mar. 2021.

FERREIRA, L. L.; CAMPOS, J. N.; TOMAZELE, A. A. S. Desempenho de cultivares de alface no município de mineiros–GO. **Anais Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar & Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar.** (ISSN-2527-2500). 2018. Disponível em: <https://www.unifimes.edu.br/ojs/index.php/coloquio/article/view/451>. Acesso em 20 Jul. 2022.

FERREIRA, L. B.; CUNHA, F. F.; DUARTE, A. B.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R. Calibration methods for the Hargreaves-Samani equation. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 42, n. 1, p. 104-114, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542018421017517>.

GADELHA, E. D. **Desenvolvimento de um protótipo para aquisição de dados de produção industrial utilizando protocolo Modbus RTU em uma rede RS-485 e interface gráfica integrada ao gerenciador de banco de dados MYSQL.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica. Fortaleza, 2019.

GAST, N.; VAN HOUTDT, B. TTL approximations of the cache replacement algorithms LRU (m) and h-LRU. **Performance Evaluation**, v. 117, p. 33-57, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peva.2017.09.002>

GAVA, R.; SILVA, E. E.; BAILO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18011/bioeng2016v10n2p154-162>

GIACOMELLI, W. **Automação como suporte ao manejo sustentado da irrigação na cultura da alface no município de Itabaiana-SE**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Programa Regional de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2011. Disponível em: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/4147>. Acesso em: 15 Dez. 2020.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, E. R.; COSCOLIN, R. B. S.; LIMA, J.; ZUÑIGA, E. A.; MACHUCA, L. M. R.; BROETTO, F. Utilização de sensor e tensiômetro no monitoramento da umidade do solo na cultura do feijoeiro sob deficiência hídrica. **Rev. Bras. Agric. Irr.** v. 11, n° 7, Fortaleza, p. 2076 - 2083, Nov - Dez, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n700710

GOMES, F. H. F.; CUNHA, F. N.; LOPES FILHO, L. C.; VIDAL, V. M.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B. Calibração de um sensor de umidade do solo de baixo custo. **Rev. Bras. Agric. Irr.** v. 11, n° 4, Fortaleza, p. 1509 - 1516, Jul - Ago, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n400605

GONÇALVES, F. V.; MEDICI, L. O.; ALMEIDA, W. S.; CARVALHO, D. F.; SANTOS, H. T.; GOMES, D. P. Irrigação no cultivo orgânico de alface utilizando Irrigás, tanque Classe A e um sistema automático de baixo custo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 11, p. 1950-1955, Nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131448>.

GUIMARÃES, P. L., SANTANA, M. A., OLIVEIRA, I. R., THOMAZ JÚNIOR, J. C. Proposta de procedimento para calibração de sensores e medidores de umidade do solo (soil moisture). **Congresso da Qualidade em Metrologia**, Rede Metrológica do Estado de São Paulo–REMES. São Paulo, 2010. Disponível em: [http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.19.11.37/doc/Guimaraes\\_Proposta.pdf](http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.19.11.37/doc/Guimaraes_Proposta.pdf). Acesso em 20 Ago. 2021.

HORIGOSHI, F. M. **Uso de sensor efeito Hall para medição da vazão de fluidos no processo de produção de palatabilizantes a base de proteína animal em escala piloto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Gestão e Inovação na Indústria Animal) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016. DOI: 10.11606/D.74.2016.tde-28112016-135201.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Mapa de clima do Brasil**. 2002. Disponível em: [http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map\\_BR\\_clima\\_2002.pdf](http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf). Acesso em: 19 set., 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Censo agropecuário 2017**. 2017a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>. Acesso em: 02 Fev. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Indicadores de desenvolvimento sustentável – Edição 2017**. 2017b. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ids/tabelas>. Acesso em: 25 Jan. 2021.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIA - **Vocabulário internacional de metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. 94 p. Disponível em: [http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim\\_2012.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf). Acesso em: 21 Mar. 2021.

IYENGAR, R. R. The water flow monitoring module. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 4, n. 3, 2016. Disponível em: <http://pnrsolution.org/Datacenter/Vol4/Issue3/16.pdf> Acesso em: 22 Mar. 2022.

KARMELI, D.; KELLER, J. **Trickle irrigation design**. California: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975.

KASHYAP, B.; RAVI, V. Universal verification methodology based verification of UART protocol. **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, p. 012040, 2020. Disponível em <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1716/1/012040/meta>. Acesso em: 20 Mar. 2022.

KINZLI, K.D.; MANANA, N.; OAD, R. Comparison of laboratory and field calibration of a soil-moisture capacitance probe for various soils. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 138, n. 4, p. 310-321, 2012. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000418](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000418)

KUGELSTADT, T. The RS-485 design guide: a short compendium for robust data transmission design. **Texas Instruments: Dallas, TX, USA**, 2008.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. **Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 635-662, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>.

LEITE, K. N.; OLIVEIRA, Q. S.; MARQUES, K. D. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, P. P.; SOUSA, G. G.; JOSÉ, J. V. Resposta da alface à aplicação de doses, de biofertilizante e lâminas de irrigação. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e22611830781, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30781>

LEITE, D. C.; JÚNIOR, G. B.; OLIVEIRA, R. H. Desenvolvimento de um sistema alternativo de irrigação para pequenos produtores do semiárido. **Scientia Plena**, v. 14, n. 7, 2018. DOI: [10.14808/sci.plena.2018.070202](https://doi.org/10.14808/sci.plena.2018.070202)

MAGALHÃES F. F.; CUNHA F. F.; GODOY R. A.; SOUZA J. E.; SILVA R. T. Produção de cultivares de alface tipo crespa sob diferentes lâminas de irrigação. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 4, p. 41-50, 2015. DOI: [10.19149/2316-6886/wrim.v4n1-3p41-50](https://doi.org/10.19149/2316-6886/wrim.v4n1-3p41-50).

MARAIS, H. Application Note AN-960, RS-485/RS-422 Circuit implementation guide. **Analog Devices, Inc.**, 2008.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. Manejo da irrigação em hortaliças. Brasília: **Embrapa Hortaliças**, 1996. 72p.

MARQUES, P. E.; TEIXEIRA, E. C. Sistema de apoio à decisão para alocação de água na agricultura irrigada em nível de microbacia hidrográfica, **Ribagua**. 2019. 6:1, 63-77, DOI: 10.1080/23863781.2019.1635918.

MCROBERTS, M. **Arduino básico**. 2 Ed., São Paulo: Novatec, 2015.

MILHOMENS, K. K. B.; NASCIMENTO, I. R.; TAVARES, R. C.; FERREIRA, T. A.; SOUZA, M. E. Avaliação de características agronômicas de cultivares de alface sob diferentes doses de nitrogênio. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 143-148, 2015. DOI: 10.18378/rvads.v10i1.2940.

MODBUS-IDA. **Modbus application protocol specification v1.1b**. Dezembro, 2006. Disponível em: [https://modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b.pdf](https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf). Acesso em 02 Jan. 2021.

MOLINE, E. F. V.; BARBOZA, E.; STRAZEIO, S. C.; BLIND, A. D.; FARIAS, E. A. P. Diferentes lâminas de irrigação na cultura da rúcula no sul de Rondônia. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 371-378, 2015. DOI: 10.3738/1982.2278.1082

MOTA, J. H., DA SILVA, C. C. R., YURI, J. E., DE RESENDE, G. M. Produção de alface americana em função da adubação nitrogenada nas condições de primavera em Jataí-GO. **Revista de Agricultura**, v. 91, n.2, p. 156 - 164, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147154/1/Milanez-2016.pdf>. Acesso em 30 de junho de 2022

OH, M. M.; CAREY, E. E.; RAJASHEKAR, C. B. Regulated water deficits improve phytochemical concentration in lettuce". **Journal of the American Society for Horticultural Science J. Amer. Soc. Hort. Sci.** v. 135, n. 3, p. 223-229, 2010. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS.135.3.223>

OLIVEIRA, L. D. S.; SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; RODRIGUES, G. D. S. Efeito do aumento da temperatura na classificação climática do município de Nossa Senhora da Glória, SE. **II Congresso Internacional da Realidade Semiárida**, UFAL. Alagoas, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/115137/1/Magna-3.pdf>. Acesso em 14 Jul. 2021.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil (ODS)**. 2021. Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 01 fev. 2021.

PAVÃO, G. C.; SIMIONE, J. R.; SOUZA, C. F. Construção de sondas TDR e avaliação em diferentes softwares de aplicação técnica. 2017. **Revista Engenharia na Agricultura**.

Viçosa, MG, DEA/UFV. ISSN 2175-6813. v.25, n. 03, p. 283-289, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v25i3.781>.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de thornthwaite-mather. **Agrometeorologia**. 2005. *Bragantia*, Campinas, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.

PEREZ, N.; GONZALEZ, E.; MUÑOZ, E. Aportes de la agricultura familiar. **Rev. Protección Veg., La Habana**, v. 30, supl. 1, p. 166, dic., 2015. Disponível em: <http://revistas.censa.edu.cu/index.php/RPV/article/view/817>. Acesso em: 23 ago. 2020.

PIEDRA-MUÑOZ, L.; GODOY-DURÁN, A.; GIAGNOCAVO, C. How to improve water usage efficiency? Characterization of family farms in a semi-arid area. **Water**, 9, 785, 2017. DOI: 10.3390/W9100785.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: **métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2 ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A., EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; CLARK, F.E. (ed.) **Methods of soil analysis** - physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSA, 1965. p.128-152. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c8>.

ROCHA, F. B.; SILVA, R. S.; AVELINO, A. M. COSTA, C. M. Plataforma de comunicação sem fio aplicada a sistemas de irrigação. **Holos**, Ano 30, v. 5, p. 269-282, out., 2014. ISSN 1807-1600. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2014.1945>.

RODRIGUES, R. A. S.; SOUSA, P. F. C. **Irrigação e drenagem**. Londrina-PR: Editora e Distribuidora Educacional S.A. 232 p. ISBN 978-85-522-0761-0. 2018.

ROLIM, G. S., SENTELHAS, P. C., BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n.1, p133-137, 1998.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. 3 ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. The influence of texture on the moisture characteristics of soils: II. Available-water capacity and moisture release characteristics. **Journal of Soil Science**, v. 16, n. 2, p. 310-317, 1965. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1965.tb01442.x>

SANTANA, I. S.; SANTOS, A. C. D.; GONÇALVES e OLIVEIRA; M. H. B.; SILVA JUNIOR, L. C.; NASCIMENTO, A. H. C. Calibração de sensores de umidade de baixo custo. **IV Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido –SBRNS**, Crato, 2019. Disponível em: <https://doity.com.br/anais/xxix-cic-ufrpe/trabalho/130499>. Acesso em 30 Jul. 2021.

SANTANA, J. S.; NASCIMENTO, C. H. S.; SILVA, C. M.; SILVA, W. A.; DAMASCENA, J. F. Resposta de cultivares de alface sob diferentes lâminas de irrigação e doses de

nitrogênio. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 16, n. 19, p. 1332-1346, 2019. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2019a/agrar/resposta.pdf>. Acesso em 10 Jul. 2022.

SANTOS, L. A.; SILVA, J. A. A.; TADEU LUCAS, A. A.; GOMES FILHO, R. R.; SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L. Sistema Lisimétrico de Informações para Monitoramento do Consumo de Água pelas Plantas (SLIMCAP). In: Tullio, L. (Org.). **Desenvolvimento de pesquisa científica na agricultura irrigada**. Ponta Grossa-PR: Atena, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.8872028107>

SANTOS, P. A.; OLIVEIRA FILHO, F. S.; CASSIMIRO, C. A. L. ARAÚJO, M. R. S.; SARMENTO, W. D.; SILVA, J. J.; PEREIRA JÚNIOR, E. B.; SIQUEIRA, E. C. Morfofisiologia da alface em canteiros econômicos no segundo ano de cultivo com diferentes lâminas de água de irrigação. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 17299-17312, 2020. DOI: [10.34117/bjdv6n4-048](https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-048)

SENA, C. C. R.; ALVES JUNIOR, J.; DOMINGOS, M. V. H.; ANTUNES JUNIOR, E. J.; BATTISTI, R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n.4, p.17228-17240 abr. 2020. DOI: [10.34117/bjdv6n4-043](https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-043)

SILVA, A. C. F.; PERUCH, L. A. M.; LUCIETTI, D.; TEIXEIRA, E. B.; MARCHESI, D. R. Produção orgânica de hortaliças no litoral sul catarinense. **Boletim Didático**, [S. l.], n. 88, 2013. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/BD/article/view/1474>. Acesso em 10 Jul. 2022.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA JÚNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 277-286, Fev. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000200017>.

SILVA, C. B. **Desempenho agrônômico da alface irrigada com águas salinas em campo e ambiente protegido**. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente). Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2019. Disponível em: <https://ud10.arapiraca.ufal.br/repositorio/publicacoes/2928>. Acesso em 20 Jun. 2022.

SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SANTOS, C. G.; SANTOS, V. R.; SÁ, M. B.; SANTOS, R. S. S.; BRANDÃO JÚNIOR, W. Q. Produtividade da alface cultivada em campo e ambiente protegido em resposta às lâminas de irrigação e níveis salinos. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, p. e8549109143-e8549109143, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9143>

SILVA, P. F.; SILVA, C. B.; SANTOS, D. P.; SANTOS, C. S.; SANTOS, M. A. L.; SILVA, J. C. Determinação do coeficiente de cultivo da cultura do pimentão (*Capsicum annum*) por meio do lisímetro de drenagem. 2017. **Rev. Bras. Agric. Irr.** v. 11, nº 7, Fortaleza, p. 2040 - 2051, Nov.-Dez., 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v11n700681>.

SILVA, J. A.; ALBUQUERQUE, J. M. D. S.; SILVA, J. C.; PINHEIRO, T. D. S.; DIVINCULA, J. S.; SANTOS, M. A. L. Cultivo de alface em ambiente protegido sob diferentes lâminas de irrigação. **IV INOVAGRI International Meeting**, 2017. Disponível

em:

[https://web.archive.org/web/20180720161401id\\_/http://www.inovagri.org/anais/TC2860756.pdf](https://web.archive.org/web/20180720161401id_/http://www.inovagri.org/anais/TC2860756.pdf). Acesso em 10 de Jul. 2022.

SILVA V. P.; TAVARES A. L.; SOUSA I. F. 2013. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e dual do coentro. **Hortic. bras.**, v. 31, n. 2, abr. - jun. 2013, pg. 255-259.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás - Brasil. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v. 35, n. 4, p. 689-698, ago., 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p689-698/2015>

SOUSA, J. S. C.; BRITO, M. E. B.; Programa computacional BHCN&CCTK: balanço hídrico climatológico normal e classificação climática de Thornthwaite e Köppen. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.5, p.35877-35898, mai., 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n5-206

SOUZA, A. L. G. **Efeito dos sistemas de produção orgânico e convencional na qualidade nutricional de alface dos grupos lisa, crespa e americana**. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2012. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/6633>. Acesso em: 14 set. 2020.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B.; VARALLO, A. C. T. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 597-606, Out.-Dez., 2013. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p597>

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, [S. l.], v. 1, n. 01, p. 26, 2018. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p26-42.

STANGA, G. C.; BRITO, R. C.; FAVARIM, F.; TODT, E. Sistema para o Monitoramento da Temperatura e Umidade de um Silo utilizando Hardware de Baixo Custo e ScadaBR. **Anais do Computer on the Beach**, p. 761-770, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14210/cotb.v0n0.p761-770>

TAVARES, A. L. **Fenometria, produtividade e necessidades hídricas das culturas da alface e do coentro em clima tropical**. Tese (Doutorado em meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1441>. Acesso em 15 Abr. 2022.

TAVEIRA, L. R. S.; CARVALHO, T. S.; TEIXEIRA, A. F. S.; CURI, N. Sustainable productive intensification for family farming in developing tropical countries.. **Ciênc. Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054201943012819>.

TELES, E. C. P. V. A.; LEITE, D. C.; ARRAES, F. D. D.; ALVES, J. E. A.; NASCIMENTO, R. C. Desenvolvimento orgânico da alface cv. veneranda em diferentes canteiros e manejo de irrigação. 2018. **PUBVET**. v.12, n.10, a182, p.1-6, Out., 2018. DOI:10.31533/pubvet.v12n10a182.1-5

TIBURSKI, G.; MOREIRA, G. T.; MISAGHI, M. Integração de Sistema Supervisório SCaDA e ERP para controle de produção em tempo real. **Revista ESPACIOS**, v. 38, n. 04, 2017. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/316217441\\_Supervisory\\_Systems\\_integration\\_SCaDA\\_and\\_ERP\\_for\\_production\\_control\\_in\\_real\\_time](https://www.researchgate.net/publication/316217441_Supervisory_Systems_integration_SCaDA_and_ERP_for_production_control_in_real_time). Acesso em 14 Jul. 2021.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p.892-898, 1980. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. 3 ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

VIEIRA, J. H.; SANTOS, L. A.; VIEIRA, J. H.; SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SOUSA, I. F. Deficit irrigation and fertigation increases the productive performance of lettuce cv. Veneranda. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 12, p. e36691210778, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i12.10778.

WINDER, A. R. S. **Lâminas de irrigação na cultura da rúcula no cerrado**. Dissertação (Mestrado Profissional em Irrigação no Cerrado). Instituto Federal Goiano, Campus Ceres, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/1830>. Acesso em 20 Jun. 2022.

YOESEPH, N. M.; PURNOMO, F. A.; HARTONO, R.; NURYANI. Lora-based IoT sensor node for Real-time Flood Early Warning System. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2022. p. 012060. DOI: 10.1088/1755-1315/986/1/012060

ZUFFO, A. M.; ZUFFO JÚNIOR, J. M.; SILVA, L. M. A.; SILVA, R. L.; MENEZES, K. O. Análise de crescimento em cultivares de alface nas condições do sul do Piauí. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 63, n.2, p. 145-153, mar/abr, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663020005>.

## ANEXO A – Folha de dados do sensor de umidade do solo HD-38\*

### Soil Moisture Hygrometer Detection Sensor Module W/ Corrosion Resistance Probe DC 3.3-12V for Arduino



#### Description:

NO.	NO.	Value
1	Name	Soil humidity sensor
2	Size	36157mm
3	Voltage	DC 3.3-12V
4	Current	<20mA; <30mA (output)
5	Interface	+ - DO AO; DO digital value; AO analog value
6	Operating Temperature	-25~85 Celsius

#### Application:

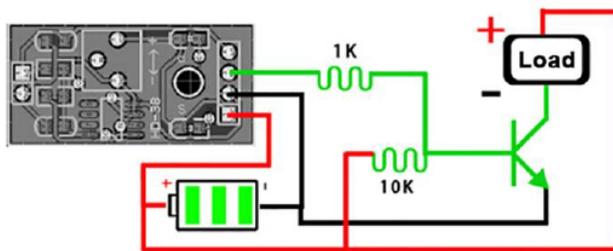
It is used for detecting soil humidity.

#### Principle:

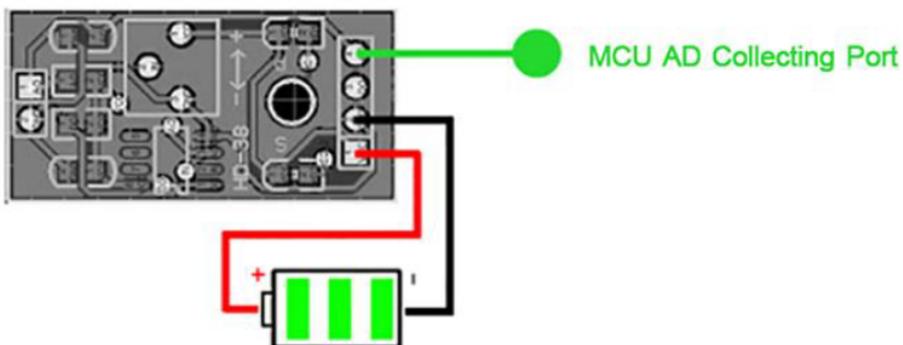
The soil humidity probe is for detecting humidity, and the voltage comparator is for judging the humidity amount. When the humidity is larger than set value, DO will output to the low level.

**Using Introduction:**

1. "+" connects power positive; "-" connects power negative. Please do not connect reversely, or it will burn the chip. After connection, "P" power indicator lamp will be on and the module will operate normally
2. Clockwise/counter clockwise adjusts the blue potentiometer, and it can improve/reduce the detection sensitivity. Take the "Thermal Sensor" as an example: if it defaults to a 25 Celsius trigger, then the DO output low level is valid. After clockwise adjusting, that is when the temperature is lower than 25 Celsius, it can trigger. If you are counter clockwise adjusting, then higher than 25 Celsius can trigger.
3. When clockwise adjusts the potentiometer so the "S" output indicator is on, it shows that the adjusting range has surpassed the testing threshold. If counter clockwise adjusting is extended to the max, it surpasses the threshold. When adjusting, please do not let them over the threshold, or it cannot be used normally. Potentiometer adjustment is only used for the DO port, and has no relevance to AO output.
4. AO output is analog value (voltage), and it can detect via MCU AD port

**Wiring Diagram 1:**

When the detected value is more than the set value, DO will output low level, the triode will be connected and the load will operate. 1K is current-limiting resistor, and 10K is pull-up resistor on DO port.

**Wiring Diagram 2:**

No more complex circuits, AO port can collect voltage via MCU AD port.

**ANEXO B – Folha de dados do sensor de vazão e volume**

YIFA the plastics Ltd  
Product Introduction

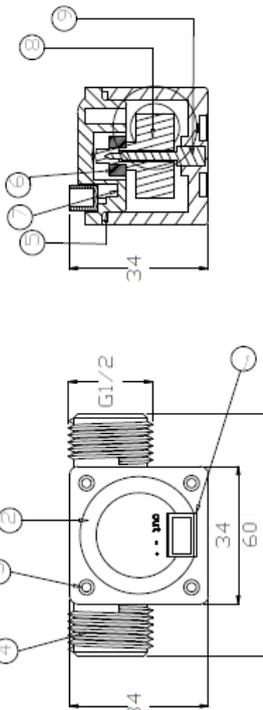
1.Model:YF-21  
 2.Product Name:Hall sensor  
 3.Flow Range: 1-30L/MIN  
 4.(1)Connection Method



(2)Voltage Range 3.5-24VDC, Pulse Characteristic:F=7Q(L/MIN).  
 (3)Extent of error:±5%.  
 (4)Flow-Pulse  
 2L/MIN=16HZ 4L/MIN=32.5HZ 6L/MIN=49.3HZ  
 8L/MIN=65.5HZ 10L/MIN=82HZ

5.Bom

No.	Item	Material	Qty.
1	Connection wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	Rustless steel axis	SUS304	1
10			
11			



Flow-Pulse	Flow-Curve	Connection method
—Flow Range:100L/H-/1800H-L/H		

Flow (L/H)	Frezq.(HZ)	Erro range
120L/H	16	±10
240L/H	32.5	
360L/H	49.3	
480L/H	65.5	
600L/H	82	
720L/H	90.2	

L/H	16	32.5	49.5	65.5	82	90.2	Freq.(HZ)
840							
720							
600							
480							
360							
240							
120							
0							

Connection method:

