



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ANGEL ANDRES ALEJO OSUNA

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA AEROPONIA COM BASE EM DÉFICIT
DE PRESSÃO DE VAPOR ACUMULADO**

**IRRIGATION MANAGEMENT IN AEROPONICS BASED ON ACCUMULATED
VAPOR PRESSURE DEFICIT**

CAMPINAS

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ANGEL ANDRES ALEJO OSUNA

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO NA AEROPONIA COM BASE EM DÉFICIT
DE PRESSÃO DE VAPOR ACUMULADO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de Água e solo

Orientador: Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo

Este trabalho corresponde a versão final da dissertação defendida pelo aluno Angel Andres Alejo Osuna, e orientado pelo Prof. Dr Antonio Pires de Camargo

CAMPINAS

2023

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

AL25m Alejo Osuna, Angel Andres, 1987-
Manejo da irrigação na aeroponia com base em déficit de pressão de vapor acumulado / Angel Andres Alejo Osuna. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Antonio Pires de Camargo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cultivo. 2. Cultivo intercalado. 3. Plantas. 4. Plantas - Cultivo. 5. Irrigação.
I. Camargo, Antonio Pires, 1986-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Irrigation management in aeroponics based on accumulated vapor pressure deficit

Palavras-chave em inglês:

Cultivation

Interspersed cultivation

Plants

Plants - Cultivation

Irrigation

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Antonio Pires de Camargo [Orientador]

Aline Azevedo Nazário

Simone da Costa Mello

Data de defesa: 08-02-2023

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0005-8249-2890>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1825515905859977>

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Ángel Andrés Alejo Osuna**, aprovada pela Comissão Julgadora em (8) de (fevereiro) de 2023, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo – Presidente e Orientador

Dra. Aline Azevedo Nazário – Membro Titular'

Dr. Simone da Costa Mello – Membro Titular

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DEDICATÓRIA

Gracias a la vida que me há dado tanto
Me há dado el sonido y el abecedario
Con el las palabras que pienso y declaro
Madre, amigo, Hermano y luz alumbrando
La ruta del alma que estoy amando.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que participaram, direta ou indiretamente, da realização desse trabalho. O dedico a quem me acompanhou ao longo de toda jornada, contribuindo com ideias, discussões, questionamentos e principalmente, paciência e sabedoria.

Aos meus pais minha avó e irmãos, Jairo, Alix, Maria Juanito e Alex, pela base familiar que me foi proporcionada desde sempre, assim como o esforço e os sacrifícios feitos para que eu pudesse alcançar mais essa etapa.

Aos amigos Combo UD, Sandra, Robinson, Juliana e Diego pelo apoio e a motivação. Ao grupo de pesquisadores do LHI, especialmente a meu Amigo e Orientador Antonio Pires de Camargo agradeço o apoio, a união, o espírito de coletividade e as parcerias formadas ao longo deste tempo.

À Universidade Estadual de Campinas e à FEAGRI pela oportunidade oferecida, aos professores e funcionários da instituição a Valéria pela paciência e apoio e a minha monitora Louise por sua companhia e ideias. Ao professor Dr. Pedro Roberto Furlani pelas informações e orientações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) -Código de Financiamento 001. Número do processo 88887,627501/2021-00 um reconhecimento pela bolsa concedida.

RESUMO

A aeroponia é um dos sistemas de cultivo sem solo com maior potencial de desenvolvimento, especialmente para aplicações em que a água é um recurso muito limitado. O objetivo deste trabalho foi avaliar níveis de déficit de pressão de vapor acumulado (DPV_{acum}) e respectivos efeitos no desenvolvimento e qualidade da alface cultivada em aeroponia. Além disso, buscou-se identificar se o DPV_{acum} serve como critério para tomada de decisões sobre o manejo da irrigação em cultivos aeropônicos. Para determinar o valor crítico de DPV_{acum} no qual a irrigação deve ser efetuada e comparar condições de cultivo em aeroponia com sistema NFT, foi adotado delineamento inteiramente casualizado, caracterizado por 5 tratamentos: T1: sistema ligado 24 h dia⁻¹ ($DPV_{acum} = 0$ kPa.h); T2: irrigar quando $DPV_{acum} = 2,0$ kPa.h; T3: irrigar quando $DPV_{acum} = 3,5$ kPa.h; T4: irrigar quando $DPV_{acum} = 5,0$ kPa.h; T5: cultivo no sistema NFT ligado 24 h dia⁻¹. O tratamento em sistema NFT (T5) foi incluído com a intuito de servir como referência, já que esse sistema é usual no cultivo de folhosas em ambiente protegido. Para comparação de tratamentos, foram realizadas as seguintes determinações na data da colheita: massa fresca da planta; número de folhas por planta; área de projeção do dossel; diâmetro da planta; área lateral de raízes; clorofila; acidez total titulável (ATT); sólidos solúveis totais (SST); e, índice de maturidade ou flavor. De modo geral os melhores resultados de desenvolvimento das plantas foram observados na condição em que o sistema foi operado 24 h dia⁻¹ (T1 e T5). Verificou-se que os níveis de DPV_{acum} acima de 2,0 kPa.h, avaliados nessa pesquisa, foram relativamente altos para o cultivo de alface em aeroponia, ocasionando déficit hídrico significativo e condições desfavoráveis para o desenvolvimento da parte aérea das plantas. Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar valores de DPV_{acum} inferiores a 2,0 kPa.h, que conduzem a irrigações mais frequentes e adequadas às exigências para cultivo de alface. Os indicadores de tempo de operação empregados para comparação dos tratamentos, evidenciam resultados expressivos em termos de economia de energia ao adotar critérios racionais de manejo de irrigação ao invés de simplesmente manter o sistema acionado 24 h dia⁻¹. Mesmo no tratamento T2, em que as irrigações foram mais frequentes, a redução no tempo de operação do sistema foi de aproximadamente 90% em relação as condições de operação 24 h dia⁻¹. Destaca-se que essas reduções no tempo de operação têm relação direta com os custos operacionais de energia elétrica para pressurização do sistema de irrigação e contribuem para tornar a atividade agrícola mais rentável para os produtores. Não foram observadas diferenças significativas no desenvolvimento da alface cultivada sob aeroponia (T1) e no sistema NFT (T5), o que favorece a disseminação e adoção de sistemas aeropônicos para o cultivo de folhosas.

ABSTRACT

Aeroponics is one of the soilless cultivation systems with the greatest potential for development, especially for applications where water is a very limited resource. The objective of this work was to evaluate levels of accumulated vapor pressure deficit (DPV_{acum}) and the corresponding effects on the development and quality of lettuce cultivated in aeroponics. In addition, we sought to identify whether the DPV_{acum} serves as a criterion for decision-making on irrigation scheduling in aeroponic crops. Seeking to determine the critical value of DPV_{acum} at which irrigation should be performed and to compare cultivation conditions in aeroponics with the NFT system, a completely randomized design was adopted, characterized by 5 treatments: T1: system turned on 24 h day^{-1} ($DPV_{acum} = 0 \text{ kPa.h}$); T2: irrigate when $DPV_{acum} = 2.0 \text{ kPa.h}$; T3: irrigate when $DPV_{acum} = 3.5 \text{ kPa.h}$; T4: irrigate when $DPV_{acum} = 5.0 \text{ kPa.h}$; T5: cultivation in the NFT system on 24 h day^{-1} . The NFT system treatment (T5) was included in order to serve as a reference, since this system is usual in the cultivation of vegetables in greenhouses. For comparison of treatments, the following determinations were performed on the harvest date: fresh weight of the plant; number of leaves per plant; canopy projection area; plant diameter; lateral area of roots; chlorophyll; titratable total acidity (TTA); total soluble solids (TSS); and, maturity or flavor index. In general, the best plant development results were observed when the system was operated 24 h day^{-1} (T1 and T5). It was verified that the DPV_{acum} levels above 2.0 kPa.h , evaluated in this research, were relatively high for the cultivation of lettuce in aeroponics, causing significant water deficit and unfavorable conditions for the development of the plants. Further researches should evaluate DPV_{acum} values lower than 2.0 kPa.h , which lead to more frequent and suitable irrigations to the requirements for growing lettuce. The operating time indicators used to compare treatments showed interesting results in terms of energy savings when adopting rational irrigation management criteria instead of simply keeping the system running 24 h day^{-1} . Even in the T2 treatment, in which the irrigations were more frequent, the reduction in the system operation time was approximately 90% in relation to the 24 h day^{-1} operation conditions. It is noteworthy that these reductions in operating time are directly related to the operating costs of electricity for pressurizing the irrigation system and contribute to making agricultural activity more profitable for producers. No significant differences were observed in the development of lettuce cultivated under aeroponics (T1) and in the NFT system (T5), which favors the dissemination and adoption of aeroponic systems for the cultivation of vegetables.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros básicos para monitoramento e controle em sistemas aeropônicos.....	21
Tabela 2. Valores de DPV reportados na literatura	30
Tabela 3. Formulação utilizada no preparo da solução nutritiva de todos os tratamentos (FURLANI et al., 2009)	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4. Especificações do bico de pulverização Jacto modelo JCI 80 0050 (roxo).....	36
Tabela 5. Número de irrigações e tempos de operação nos ciclos de cultivo	51
Tabela 6. Resumo de indicadores de desenvolvimento vegetal e produção nos ciclos de cultivo avaliados	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação de tamanho de gotas (JACTO, 2022a).....	22
Figura 2. Duas cultivares de alface cultivadas em substrato, sistema NFT e aeroponia (LI et al., 2018b).....	24
Figura 3. Quatro sistemas aeropônicos avaliados na produção de alface: N1 = bicos de pulverização com injeção de ar comprimido; N2 e N3 = bicos de pulverização sem ar comprimido; N4 = emissores ultrassônicos (TUNIO et al., 2021).....	25
Figura 4. Abertura e fechamento dos estômatos.....	26
Figura 5. Relações ambientais dentro da estufa (adaptado de ARGUS, 2009).....	28
Figura 6. Ferramenta online para geração de gráfico de DPV (Adaptado de https://www.omnicalculator.com/biology/vapor-pressure-deficit#what-is-vapor-pressure-deficit-DPV)	29
Figura 7. Refratômetro manual.....	32
Figura 8. Estufa agrícola para a condução dos experimentos.....	34
Figura 9. Módulos para condução dos experimentos em aeroponia e em sistema NFT	35
Figura 10. Disposição dos bicos e plantas no módulo de aeroponia (triângulos representam bicos e círculos representam plantas) (A e B); Peças para montagem dos bicos (C).....	36
Figura 11. Esquema ilustrando os principais componentes dos módulos de aeroponia.....	37
Figura 12. Rede IoT (Internet of Things) para aquisição de dados, controle de atuadores e automação do experimento.....	38
Figura 13. Etapas do cultivo	40
Figura 14. Medidor de clorofila SPAD 520.	40
Figura 15. Estúdio para aquisição de imagens	42
Figura 16. Processamento de imagens da parte aérea: (a) imagem original (b) imagem em escala de cinza (c) imagem segmentada	42
Figura 17. Processamento de imagens do sistema radicular: (a) imagem original (b) imagem em escala de cinza (c) imagem segmentada	42
Figura 18. Dados de temperatura do ar (máxima, média e mínima) dentro e fora do ambiente de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023).....	45
Figura 19. Dados de umidade relativa do ar (máxima, média e mínima) dentro e fora do ambiente de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023).....	46

Figura 20. Dados diários de radiação global e evapotranspiração de referência fora do ambiente de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023).....	47
Figura 21. Variação de pH e condutividade elétrica da solução nutritiva nos ciclos de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023).....	48
Figura 22. Número de irrigações por dia nos tratamentos T2, T3 e T4, e déficit de pressão de vapor acumulado a cada dia do experimento (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023).....	50
Figura 23. Dados de temperatura e umidade do ar em 13/10/2022 acompanhados de horários de irrigações nos tratamentos T2, T3 e T4	51
Figura 24. Número de irrigações por dia nos tratamentos T2, T3 e T4, e Evapotranspiração de referência no ambiente externo (ET_0) (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)	52
Figura 25. Fotografias de plantas cultivadas em cada um dos tratamentos.....	54
Figura 26. Crescimento de área de projeção do dossel ao longo dos ciclos de cultivo (barras de erros indicam valores de desvio-padrão amostral)	55
Figura 27. Diâmetro médio das plantas (vista de topo) ao longo dos ciclos de cultivo (barras de erros indicam valores de desvio-padrão amostral)	55
Figura 28. Área de raízes (vista lateral) ao longo dos ciclos de cultivo (barras de erros indicam valores de desvio-padrão amostral)	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Sistemas de cultivo sem solo em ambiente protegido	17
2.2	Aeroponia.....	18
2.3	Tamanho de gotas e tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas.....	21
2.4	Tamanho de gotas e intervalo entre aplicações na aeroponia para o cultivo de alface 23	
2.5	Movimento de água na planta e evapotranspiração	25
2.6	Déficit de pressão de Vapor (DPV)	27
2.7	Manejo de irrigação	30
2.8	Alface.....	31
2.9	Parâmetros de qualidade de hortaliças folhosas.....	31
2.9.1	Clorofila.....	32
2.9.2	Sólidos solúveis totais	32
2.9.3	Acidez Total Titulável (ATT)	32
2.9.4	Índice de maturidade (<i>Ratio</i>).....	33
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Condições gerais de cultivo e módulos experimentais	34
3.2	Rede IoT para aquisição de dados, controle de atuadores e automação do experimento 37	
3.3	Delineamento experimental	39
3.4	Indicadores de desenvolvimento das plantas	40
3.5	Análise de dados	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	Condições meteorológicas durante o cultivo	44
4.2	Solução nutritiva	48

4.3	Manejo da irrigação	49
4.4	Desenvolvimento vegetal.....	53
5	CONCLUSÕES.....	58
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Devido ao rápido crescimento da população mundial junto ao efeito das mudanças climáticas, a demanda por água doce vem aumentando constantemente evidenciando limitações de recursos hídricos e riscos à segurança alimentar (ABIOYE et al., 2020; DEJONGE et al., 2015). A disponibilidade de água é limitada principalmente para a produção de alimentos, sendo a agricultura responsável por pelo menos 70% do consumo deste recurso. Considerando a limitação e as disputas pelo uso de recursos hídricos, agricultores precisam adotar práticas responsáveis quanto ao uso da água para a produção de alimentos (FAO, 2021). Portanto, é vital que a agricultura incorpore práticas que permitam uso racional e eficiente da água para irrigação (PADRÓN, 2021).

No momento da irrigação deve-se procurar fornecer a quantidade requerida pela planta para evitar o déficit hídrico, minimizando o desperdício de água e garantindo a produtividade e qualidade da produção (RASSINI, 2011). Uma prática essencial na agricultura é a aplicação artificial de água por meio de um sistema de irrigação manejado de modo que se aplique a quantidade de água necessária para garantir o desenvolvimento da cultura (ABIOYE et al., 2020; BAYONA-PENAGOS; VÉLEZ-SÁNCHEZ; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, 2017; PADRÓN, 2021).

Nos últimos anos, observa-se um interesse crescente pela produção de alimentos empregando sistemas de cultivo sem solo em ambiente protegido, sendo que isso inclui fazendas urbanas, sistemas de cultivo vertical e indoor. Ainda que nas condições atuais os custos operacionais e de investimento sejam, provavelmente, o maior entrave para ampla adoção desses sistemas modernos e intensivos de cultivo, a combinação do cenário de mudanças climáticas, as perspectivas de escassez de recursos e a crescente demanda por alimentos poderá viabilizar, cada vez mais, tais sistemas.

Entende-se que sistemas de cultivo sem solo em ambiente protegido destacam-se em relação aos sistemas convencionais pela eficiência no uso de recursos, possibilidade de maior controle das condições ambientais, menor necessidade de uso de defensivos agrícolas para controle de doenças, pragas e plantas invasoras. Em condições adequadas de cultivo, tais sistemas favorecem o desenvolvimento das culturas contribuindo para melhora na produtividade e qualidade dos produtos agrícolas.

A aeroponia é um dos sistemas de cultivo sem solo praticado em diferentes países do mundo para o cultivo de diversas plantas (GURLEY, 2020; LAKHIAR et al., 2018a). É uma

forma de cultivo na qual o sistema radicular das plantas fica suspenso no ar e recebe a solução nutritiva que é pulverizada no entorno das raízes. Os principais fatores a serem considerados nos cultivos em aeroponia são a umidade, temperatura e concentração de gases no ambiente onde as raízes se desenvolvem, bem como a nutrição mineral das plantas (WEATHERS; ZOBEL, 1992).

Em relação aos demais sistemas de cultivo sem solo, a aeroponia destaca-se pelo potencial para otimização no uso de solução nutritiva (LAKHIAR et al., 2020). Além disso, por ser um sistema desprovido de substrato, este sistema de cultivo facilita a inspeção visual do sistema radicular da cultura, o que favorece investigações referentes ao crescimento radicular de plantas (CLAWSON et al., 2000a). O cultivo com o sistema radicular envolto por ar permite o controle da umidade, temperatura e disponibilidade de oxigênio na região radicular.

Assim como em outros sistemas de cultivo, a aeroponia também apresenta desafios, sendo que um deles está relacionado ao tamanho das gotas pulverizadas no sistema radicular. Apesar da influência do tamanho das gotas em sistemas de produção aeropônicos já ter sido objeto de estudos recentes (LAKHIAR et al., 2019a; TUNIO et al., 2021a), ainda há incertezas nos valores a serem adotados. Relata-se que gotas relativamente grandes formam uma fina camada de água sobre as raízes, podendo interferir na absorção de água e nutrientes, bem como limitar as trocas gasosas (WEATHERS; ZOBEL, 1992). Nessas condições, sucessivos ciclos com a pulverização ativada e desativada são importantes para assegurar oxigenação suficiente do sistema radicular. Por outro lado, sob condições de tamanho de gotas suficientemente pequenas, supõe-se que a formação de filme de água sobre as raízes seja menos provável, possibilitando a manutenção da pulverização ativada continuamente. Já as gotas demasiadamente finas produzem uma quantidade excessiva de pelos radiculares e inibem o desenvolvimento de raízes necessárias para o adequado desenvolvimento da planta (BUCKSETH et al., 2016; LAKHIAR et al., 2019b; TUNIO et al., 2021a).

Não há critérios claros para a tomada de decisão sobre o intervalo entre pulverizações, embora seja evidente que isso é influenciado pela cultura e pelas condições climáticas locais. Também não há definição clara quanto à duração dos eventos de pulverização, sendo possível simplesmente manter o sistema continuamente ligado. Essa opção, além de trazer consumo máximo de energia, pode favorecer a incidência de fitopatógenos nas plantas, havendo ainda relatos de que pode causar problemas de hipóxia dependendo do tamanho das gotas pulverizadas no sistema radicular. Portanto levando em consideração a dificuldade para determinar o intervalo entre e a duração das pulverizações, realizou-se uma revisão de literatura

na qual os autores investigados arbitram o intervalo e a duração das pulverizações evidenciando que há margem para contribuições científicas que auxiliem a definir melhor esses parâmetros operacionais necessários para o manejo da irrigação em cultivos aeropônicos. Diante do exposto, as seguintes hipóteses foram formuladas: (1) O intervalo entre irrigações na aeroponia pode ser definido com base no Déficit de Pressão de Vapor (*DPV*) acumulado, com o monitoramento de umidade relativa e temperatura do ar do ambiente; (2) O intervalo entre irrigações e os consequentes níveis de déficit hídrico interferem na relação entre o crescimento de raízes e da parte aérea da cultura, assim como na duração do ciclo de cultivo, sendo que deve existir condições ótimas para o desenvolvimento da alface cultivada em aeroponia.

Acerca desse assunto, o objetivo deste trabalho foi avaliar níveis de déficit de pressão de vapor acumulado e respectivos efeitos no desenvolvimento e qualidade da alface cultivada em aeroponia. Além disso, buscou-se identificar se o déficit de vapor acumulado serve como critério para tomada de decisões sobre o manejo da irrigação em cultivos aeropônicos em ambiente protegido.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas de cultivo sem solo em ambiente protegido

Cultivos em ambiente protegido são utilizados na produção de hortaliças, plantas ornamentais e outras culturas de alto valor. É crescente a adoção de sistemas de cultivo sem solo (*soiless systems*), os quais são baseados no uso de soluções nutritivas, com ou sem o uso de substratos (RAVIV, et al., 2019). Em relação aos cultivos convencionais em campo aberto, cultivos sem solo em ambiente protegido podem conduzir a melhores resultados produtivos, econômicos e ambientais, pois permitem maior controle sobre fatores ambientais, maior eficiência no uso de água e fertilizantes, menor incidência de pragas e doenças e, conseqüentemente, menor necessidade de agroquímicos (RAVIV et al., 2019; SONNEVELD, et al., 2009).

Parte dos sistemas de cultivo sem solo empregam substratos como meio de cultivo, sendo que o substrato serve como meio para o desenvolvimento do sistema radicular e sustentação da planta, além de apresentar capacidade de armazenamento de solução nutritiva. Idealmente, todos os nutrientes necessários para o desenvolvimento da planta são fornecidos via solução nutritiva, sendo desejável que o substrato seja o mais inerte possível quimicamente. Nestes sistemas de cultivo, a solução nutritiva pode ser aplicada por gotejamento, microaspersão ou outro sistema de irrigação, podendo haver a coleta e recirculação da solução (sistemas hidraulicamente fechados) ou não (sistemas hidraulicamente abertos). Na maioria dos cultivos brasileiros, a solução nutritiva não é reaproveitada após passar pelo sistema radicular da cultura, sendo comum que a irrigação inclua uma lâmina de lixiviação adicional de 10% a 20% das necessidades hídricas da cultura (ALVARENGA, 2013), a fim de evitar aumento excessivo da salinidade no meio de cultivo.

Em países desenvolvidos, sistemas de produção em ambiente protegido vêm sendo pressionados para reduzir impactos ao meio-ambiente, de modo que a coleta e recirculação da solução nutritiva já é obrigatória em alguns países europeus (RAVIV et al., 2019; VAN OS, 2017). Nos sistemas de cultivo com recirculação da solução nutritiva, com ou sem substrato, há potencial para benefícios em termos de eficiência no uso de água e nutrientes, assim como redução de riscos de impacto ambiental relacionados à lixiviação de solução nutritiva.

Dentre os sistemas de cultivo com recirculação de solução e sem substrato, destaca-se o sistema NFT (*Nutrient Film Technique*). Neste sistema, as raízes ficam parcialmente imersas

na solução nutritiva que escoam dentro de calhas ou canaletas. A solução é bombeada para o topo de calhas e escoam por gravidade em direção ao tanque, mantendo uma fina lâmina de solução nutritiva que fornece água e nutrientes para o sistema radicular das plantas. Como principais vantagens, o sistema NFT elimina os custos relacionados à aquisição, recuperação e disposição de substratos, assim como aqueles relacionados à instrumentação requerida para monitoramento da umidade do meio de cultivo e manejo da irrigação. Como limitações, destaca-se o risco de oxigenação insuficiente do sistema radicular e prejuízos ao desenvolvimento da planta, especialmente se a temperatura da solução nutritiva for elevada. Por este motivo, o uso de dispositivos para aeração da solução nutritiva é necessário no sistema NFT. Além disso, nos sistemas de cultivo em NFT, quedas de energia ou demais falhas no sistema de fornecimento de solução nutritiva para as plantas podem comprometer totalmente a produção.

De modo geral, sistemas de cultivo sem solo com recirculação da solução nutritiva destacam-se por questões ambientais e de eficiência no uso de água e nutrientes. Todavia, a obtenção de resultados satisfatórios apresenta diversos desafios/limitações: elevados custos; a falta de conhecimento para manejo da fertirrigação que conduz a incertezas sobre o desempenho da cultura; risco de proliferação de fitopatógenos; risco de obstrução de gotejadores e outros emissores, quando estes são parte do sistema que aplica a solução nutritiva; aumento gradual da concentração de sais e desequilíbrio entre nutrientes na solução nutritiva, podendo prejudicar o desempenho da cultura; disposição de substratos e de soluções nutritivas inapropriadas para recirculação após determinado tempo de uso (RAVIV; LIETH; BAR-TAL, 2019; SONNEVELD; VOOGT, 2009).

No Brasil, cultivos em sistemas com recirculação ainda precisam ser aprimorados, buscando-se alta produtividade e elevada eficiência no uso de água e nutrientes (GIMÉNEZ; ANDRIOLO; GODOI, 2008). Embora haja a tendência e interesse na adoção de sistemas com recirculação da solução nutritiva, os riscos e desafios mencionados conduzem à insegurança e, por isso, sistemas com recirculação da solução ainda são incipientes no país.

2.2 Aeroponia

A aeroponia é uma das técnicas de cultivo sem solo em ambiente protegido. A palavra aeroponia é derivada da palavra latina *aero* (ar) e *pônico* (trabalho) (BUCKSETH et al., 2016), sendo que o termo se refere ao cultivo de plantas com suas raízes expostas a uma névoa de solução nutritiva. Neste sistema de cultivo, não se utiliza solo ou substrato e não há imersão do

sistema radicular da planta em solução nutritiva, de forma que as raízes são mantidas suspensas no ar e no interior de um ambiente totalmente escuro.

O cultivo em aeroponia é realizado em um ambiente fechado ou semifechado equipado com dispositivos para pulverizar a solução nutritiva nas raízes das plantas. Neste ambiente, as raízes encontram condições adequadas de oxigenação, temperatura e umidade que permitem assimilação de nutrientes e desenvolvimento apropriado (GOPINATH; VETHAMONI; GOMATHI, 2017; VAN OS; GIELING; HEINRICH LIETH, 2019).

Weathers e Zobel (1992) relatam alguns dos primeiros usos de aeroponia para pesquisas no cultivo de abacaxi (1942), citrus (1944), maçã (1953) e tomate (1957). Os autores mencionam que o cultivo em aeroponia é viável para investigações sobre estresse hídrico, nutrição mineral, caracterização morfológica e fisiológica de plantas, enfatizando-se a facilidade para estudos de caracterização da arquitetura radicular de plantas.

Tunio et al. (2021) relatam que a aeroponia tem sido aplicada com sucesso em hortaliças folhosas, tubérculos, ervas aromáticas e plantas medicinais. Além disso, muitos estudos recentes empregam aeroponia para a produção de batata-semente (BALENA et al., 2021; BUCKSETH et al., 2016, 2021; BUDIASIH et al., 2020; ÇALIŞKAN et al., 2021; CALORI et al., 2017; KUNCORO et al., 2021; ORABY; LACHANCE; DESJARDINS, 2015; RITTER et al., 2001; RYKACZEWSKA, 2016; TESSEMA et al., 2017), pois a aeroponia é um dos métodos mais rápidos para a propagação vegetativa e produção de batata-semente, já que os tubérculos produzidos estão isentos de problemas fitossanitários e a produtividade é superior a técnicas convencionais de cultivo (BUCKSETH et al., 2016). Pesquisas recentes também mencionam aeroponia para o cultivo de alface (GOPINATH; VETHAMONI; GOMATHI, 2017; HIKOSAKA et al., 2015; LAKHIAR et al., 2019a; LI et al., 2018a; TUNIO et al., 2021a), tomate (KOMOSA et al., 2020; LAKHIAR et al., 2018b) e uma variedade de outras plantas (GURLEY, 2020b).

A aeroponia é possivelmente um dos sistemas de cultivo mais intensivos, pois permite controle de condições ambientais, inclusive na zona radicular da cultura, favorecendo a otimização de recursos e a maximização do desempenho da cultura. Em estudo realizado pela NASA em condições de gravidade reduzida, observou-se reduções de até 98% no uso de água, de 60% no uso de nutrientes e de 100% no uso de pesticidas e herbicidas, não havendo restrições ao desenvolvimento e desempenho das culturas (CLAWSON et al., 2000b; NASA, 2006). Como outro exemplo, estima-se que a produção de 1 kg de tomate em cultivo convencional

requer de 200 a 400 L de água, ao passo que em NFT requer cerca de 70 L e, em aeroponia, apenas cerca de 20 L (GOPINATH; VETHAMONI; GOMATHI, 2017).

Dentre as potenciais vantagens da aeroponia em relação a outros sistemas de cultivo, destacam-se: consumo otimizado de água e nutrientes uma vez que os bicos pulverizadores operam com vazão baixa, a solução nutritiva recircula no sistema e as perdas são mínimas; produção independente de características de solo ou substrato, já que o meio de cultivo é o próprio ar; possibilidade de cultivos em sistemas verticais, maximizando a densidade de plantas no espaço destinado à produção; possibilidade de produção próximo do mercado consumidor (cultivos em ambiente protegido); baixa interferência de adversidades climáticas e possibilidade de produção ao longo do ano todo para cultivos em ambiente protegido; redução de problemas fitossanitários associados ao meio de cultivo (solo ou substrato); possibilidade de elevado nível de controle e automação das condições de cultivo.

Como principais desafios da aeroponia, destacam-se a dependência de energia para manutenção do sistema de irrigação pressurizado e o risco elevado de perda da produção mesmo que as falhas ocorram por tempo curto; risco de entupimento dos emissores utilizados para a pulverização da solução nutritiva devido à orifícios com dimensões reduzidas; risco de disseminação de fitopatógenos pela solução nutritiva, já que esta recircula continuamente; necessidade de mão de obra qualificada e/ou adequado nível de automação para detecção de falhas no sistema e rápida correção para evitar danos severos à produção (LAKHIAR et al., 2018a; POTOS, 2015).

A aeroponia não é usada mais extensivamente por questões de viabilidade econômica, por causa do conhecimento incompleto sobre os parâmetros operacionais e pela dificuldade em manter um sistema operacional a fim de assegurar adequado desempenho da cultura (LAKHIAR et al., 2018a; WEATHERS; ZOBEL, 1992). Alguns dos fatores a serem considerados nos cultivos em aeroponia são a umidade, temperatura e concentração de gases no ambiente onde as raízes se desenvolvem, bem como a nutrição mineral das plantas (WEATHERS; ZOBEL, 1992). A Tabela 1 mostra os parâmetros essenciais no monitoramento e controle de sistemas de cultivo em aeroponia.

Lakhiar et al. (2019) recomendam que a solução nutritiva não seja aplicada continuamente, respeitando intervalos específicos que variam conforme a cultura e as condições climáticas locais. Os autores ainda ressaltam que a pulverização contínua pode contribuir para problemas fitossanitários e aumentar a sensibilidade da planta a eventuais interrupções de curta

duração no fornecimento de solução nutritiva. Segundo os autores, a definição do intervalo e a duração das aplicações são essenciais para o adequado desenvolvimento da cultura.

Tabela 1. Parâmetros básicos para monitoramento e controle em sistemas aeropônicos

Parâmetro	Valor usual	Instrumentos
Atomização da solução nutritiva	- 5 a 25 µm em nebulizadores ultrassônicos - 5 a 100 µm em bicos de pulverização	Atomização com ou sem a injeção de ar comprimido, ou ainda com nebulizadores ultrassônicos
Meio de crescimento	Suporte artificial de planta (ex., netpot)	Qualquer estrutura artificial para suporte de raiz
pH desejável da solução nutritiva	O valor do pH depende da planta (usualmente de 5,5 a 6,5)	Dispositivo de medição de pH
CE desejável da solução nutritiva	O valor CE depende da planta	Dispositivo de medição de CE
Umidade do ar	Manter 100% de umidade do ar	Termohigrômetro
Temperatura	Ideal de 15 a 25°C, não deve ser superior a 30°C e não deve ser inferior a 4°C	Termohigrômetro
Luz na zona radicular	O ambiente dentro do qual há o crescimento radicular deve ser escuro	Utilizar recipiente opaco
Tempo de atomização	Depende das características da cultura e de componentes do sistema de aeroponia	Temporizador
Intervalo entre atomização	Depende do estágio de crescimento da cultura e de condições climáticas	Temporizador

Adaptado de (LAKHIAR et al., 2018a)

2.3 Tamanho de gotas e tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas

O tamanho de gotas é um dos parâmetros que interfere no desenvolvimento de plantas cultivadas em aeroponia (LAKHIAR et al., 2019; TUNIO et al., 2021), ainda que os fundamentos teóricos sejam limitados na literatura desse campo de pesquisa. A área de tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas aborda assuntos que podem ser aplicáveis à aeroponia, auxiliando na compreensão e melhoria de processos relacionados à aplicação da solução nutritiva no sistema radicular dos cultivos em aeroponia.

Os pulverizadores hidráulicos são os equipamentos mais utilizados na aplicação de defensivos agrícolas. Nestes equipamentos, um líquido é pressurizado através de um orifício ou

bocal, sendo lançado no ar e se desintegrando em gotas de diferentes tamanhos. No contexto de tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas, o dispositivo responsável pelo controle de vazão e de distribuição de tamanho de gotas costuma ser denominado bico ou ponta de pulverização.

Qualquer que seja o bico de pulverização empregado, é esperada a aplicação de tamanhos de gotas em uma determinada faixa. O tamanho de gotas pode ser quantificado pelo diâmetro mediano volumétrico (DMV), diâmetro mediano numérico (DMN) e coeficiente de dispersão. O DMV é o diâmetro que divide o volume pulverizado em duas partes iguais, ou seja, metade do volume pulverizado apresenta diâmetro inferior ao DMV e a outra metade contém gotas maiores do que DMV. O DMN é o diâmetro que divide o número de gotas em duas partes iguais, ou seja, metade do número de gotas é maior do que DMN e a outra metade é menor. O coeficiente de dispersão expressa a uniformidade de um conjunto de gotas e é obtido dividindo-se DMV por DMN.

A norma ANSI/ASAE S572.3 (2020) define faixas de tamanho de gotas para a classificação de bicos para pulverização, sendo recomendado o uso de instrumentos laser para a caracterização da distribuição de tamanho de gotas. Como um bico de pulverização não produz um tamanho único de gotas, o indicador mais utilizado para a classificação da pulverização é o DMV. Comercialmente, a Figura 1 apresenta a classificação de tamanho de gotas adotada pela empresa Jacto.

CÓDIGO / CODE		TAMANHO DE GOTA / TAMAÑO DE GOTA / DROPLET SIZE (in microns)
XF	Extremamente Fina Extremamente Fina Extremley Fine	<60
VF	Muito Fina Muy Fina Very Fine	60 - 145
F	Fina Fine	146 - 225
M	Média Mediana Medium	226 - 325
C	Grossa Gruesa Coarse	326 - 400
VC	Muito Grossa Muy Gruesa VeryCoarse	401 - 500
XC	Extremamente Grossa Extremamente Gruesa Extremley Coarse	501 - 650
UC	Ultra Grossa Ultra Gruesa Ultra Coarse	>650

Figura 1. Classificação de tamanho de gotas (JACTO, 2022a)

No âmbito de tecnologia de aplicação, segundo ANDEF (2010), gotas maiores do que 400 µm sofrem menos efeitos de vento, deriva e evaporação no trajeto até o alvo, mas proporcionam menor cobertura da superfície a ser tratada e estão mais sujeitas ao escorrimento

sobre as folhas. Gotas menores do que 200 μm proporcionam elevada cobertura do alvo sob condições climáticas adequadas, possuem alta capacidade de penetração na cultura e baixa suscetibilidade ao escoamento sobre as folhas, porém são sensíveis a efeitos de deriva e evaporação. Gotas entre 200 e 400 μm apresentam características intermediárias.

Existem diversos modelos de bicos de pulverização, sendo que os mais usuais são os do tipo plano e os cônicos. Conforme ANDEF (2010), os bicos do tipo plano ou leque produzem jato em um só plano e seu uso é mais indicado para alvos planos como solo, parede ou mesmo para algumas culturas. Esse tipo de bicos pode ser utilizado para aplicação de herbicidas, fungicidas e inseticidas sobre o solo. Já os bicos do tipo cone cheio são preferíveis na pulverização de alvos irregulares, pois as gotas se aproximam do alvo em diferentes ângulos, proporcionando uma melhor cobertura das superfícies. Existem ainda os bicos do tipo cone vazio, nos quais a deposição de gotas se concentra na periferia do cone podendo produzir gotas mais finas do que os cones cheios.

Com os fundamentos apresentados neste tópico, entende-se que, para a aplicação da solução nutritiva no sistema radicular de plantas cultivadas em aeroponia, os bicos do tipo cone e a aplicação de gotas classificadas como muito finas ou extremamente finas (Figura 1) parecem ser apropriadas, pois o alvo (raízes) é irregular, de forma que gotas relativamente pequenas têm maior capacidade de penetração nas plantas e proporcionam adequada cobertura do alvo.

2.4 Tamanho de gotas e intervalo entre aplicações na aeroponia para o cultivo de alface

Em estudos sob gravidade reduzida (CLAWSON et al., 2000a), relatou-se que uma névoa caracterizada por gotas de 1 μm é inadequada para molhar as raízes pois não proporciona adequada cobertura do sistema radicular. Por outro lado, gotas maiores do que 100 μm formam uma fina lâmina de água, podendo limitar a disponibilidade de oxigênio no sistema radicular. Relata-se que é importante que a água não permaneça acumulada por muito tempo sobre as raízes, a fim de que não haja restrições às trocas gasosas. Nas condições avaliadas de gravidade reduzida, o tamanho de gotas mais adequado foi de 30 μm , comentando-se que, sob condições normais de aceleração da gravidade, espera-se resultados similares.

Li et al. (2018) usaram bicos pulverizadores com injeção de ar para produzir gotas de 50 μm , com operação por 20 s e intervalos de 30 s entre pulverizações. Os autores comparam características agronômicas da alface cultivada em aeroponia, em sistema NFT e em substrato e relatam que o sistema radicular mais desenvolvido foi observado nas plantas cultivadas em

aeroponia. Entretanto, as plantas que apresentaram melhor desenvolvimento da parte vegetativa foram aquelas cultivadas em NFT (Figura 2). Os autores mencionam ainda que é provável ter havido restrições de água e nutrientes nas condições de cultivo em aeroponia devido a questões de tamanho de gotas e intervalo entre pulverizações. Além disso, recomendam que sejam realizadas mais pesquisas avaliando tamanho de gotas e intervalo entre pulverizações a fim de melhorar o desempenho das culturas cultivadas em aeroponia.

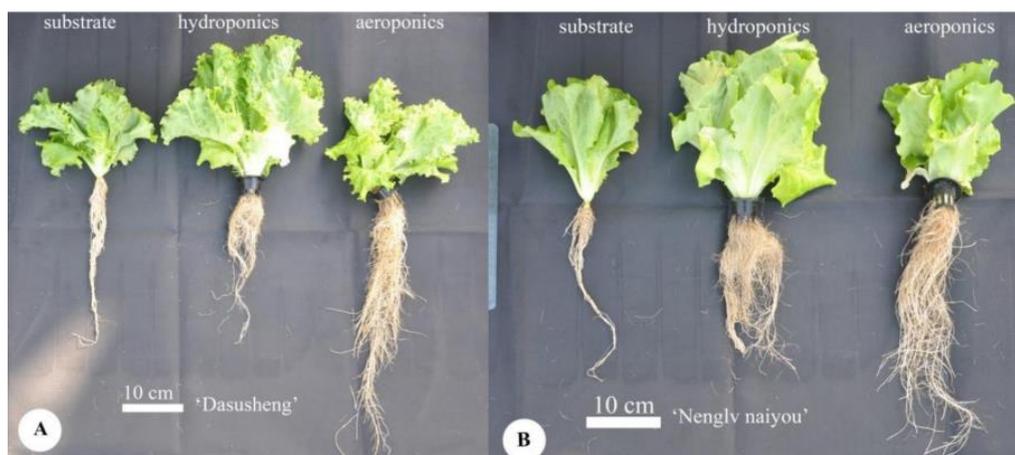


Figura 2. Duas cultivares de alface cultivadas em substrato, sistema NFT e aeroponia (LI et al., 2018b)

Lakhiar et al. (2019) avaliaram o efeito de três atomizadores: A1 = bico pulverizador equipado com injeção de ar comprimido, com tamanho de gotas de 23,3 μm ; A2 = bico pulverizador, com tamanho de gotas de 46,4 μm ; A3 = nebulizador ultrassônico, com tamanho de gotas de 3,4 μm . No estudo, fixaram-se ciclos de operação mantendo o sistema ligado por 20 min e desligado por 3 h. Os autores concluíram que o tratamento A2 conduziu aos melhores resultados na produção de alface em aeroponia.

Tunio et al. (2021) avaliou a alface cultivada em aeroponia sob quatro tamanhos de gotas (N1 = 11,24 μm ; N2 = 26,35 μm ; N3 = 17,38 μm ; N4 = 4,89 μm) e três intervalos entre pulverizações (I1 = 30 min; I2 = 45 min; I3 = 60 min), sendo a duração das pulverizações fixada em 5 min (Figura 3). O condicionamento do tamanho de gotas em N1 foi obtido utilizando bicos e injeção de ar comprimido. As condições N2 e N3 foram obtidas apenas por pressurização, sem injeção de ar comprimido. A condição N4 empregou nebulizadores ultrassônicos (*ultrasonic foggers*). O maior número de folhas por planta foi observado no tratamento N1I1 e o menor em N4I3. Além disso, observou-se que o aumento no intervalo entre pulverizações reduziu o desenvolvimento radicular das plantas em todos os tratamentos. Dentre os tratamentos, destacou-se o N1I1 para a produção de alfaces em aeroponia.

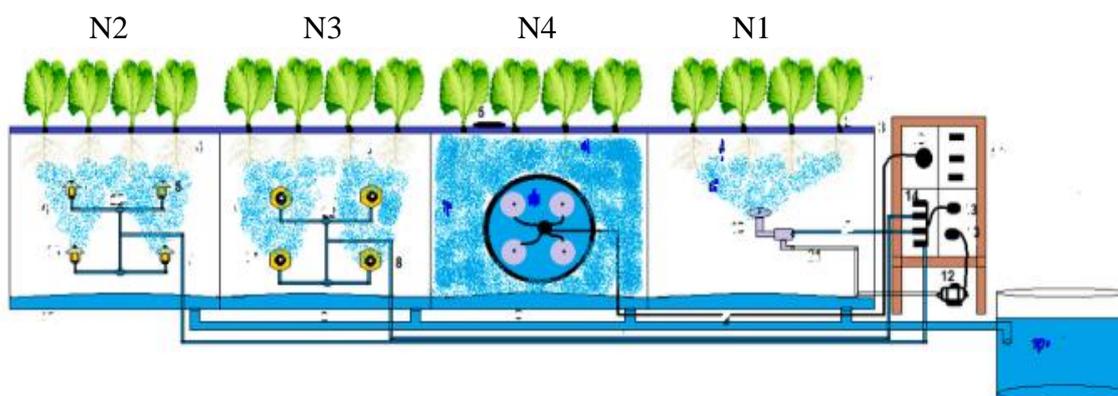


Figura 3. Quatro sistemas aeropônicos avaliados na produção de alface: N1 = bicos de pulverização com injeção de ar comprimido; N2 e N3 = bicos de pulverização sem ar comprimido; N4 = emissores ultrassônicos (TUNIO et al., 2021a)

Uma interessante ferramenta mencionada em algumas das pesquisas sobre aeroponia são os softwares para caracterização radicular a partir de imagens (LI et al., 2018a; TUNIO et al., 2021a). Esses softwares servem para caracterizar a arquitetura e dimensões do sistema radicular de plantas a partir de imagens e reduzem tanto a mão-de-obra quanto o tempo necessários para determinações manuais de dimensões de raízes. Observa-se que existem diversos softwares para a mesma aplicação, tais com: EZ-Rhizo (ARMENGAUD et al., 2009); DynamicRoots (SYMONOVA; TOPP; EDELSBRUNNER, 2015); EZ-Root-VIS (SHAHZAD et al., 2018); arquidART (DELORY et al., 2016, 2018); GT-RootS (BORIANNE et al., 2018); saRIA (NARISSETTI et al., 2019); RhizoVision Explorer (SEETHEPALLI et al., 2021). No entanto, testes são necessários para avaliar quais dessas ferramentas são mais interessantes para caracterização da arquitetura radicular de plantas diversas cultivadas em aeroponia.

2.5 Movimento de água na planta e evapotranspiração

A maior parte da água absorvida pelas raízes das plantas é perdida para o ambiente na forma de vapor d'água, sendo que esse processo é denominado transpiração e é essencial para a fotossíntese. A abertura e o fechamento estomáticos (Figura 4) controlam as trocas gasosas na superfície foliar, sendo que cerca de 90% da água transpirada pelas plantas é perdida pelos estômatos enquanto que o restante é perdido pela cutícula (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2014). Fatores ambientais relacionados a luz, temperatura, status hídrico foliar e concentração intracelular de CO₂, são percebidos pelas células-guarda e geram respostas de controle estomático (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2014).

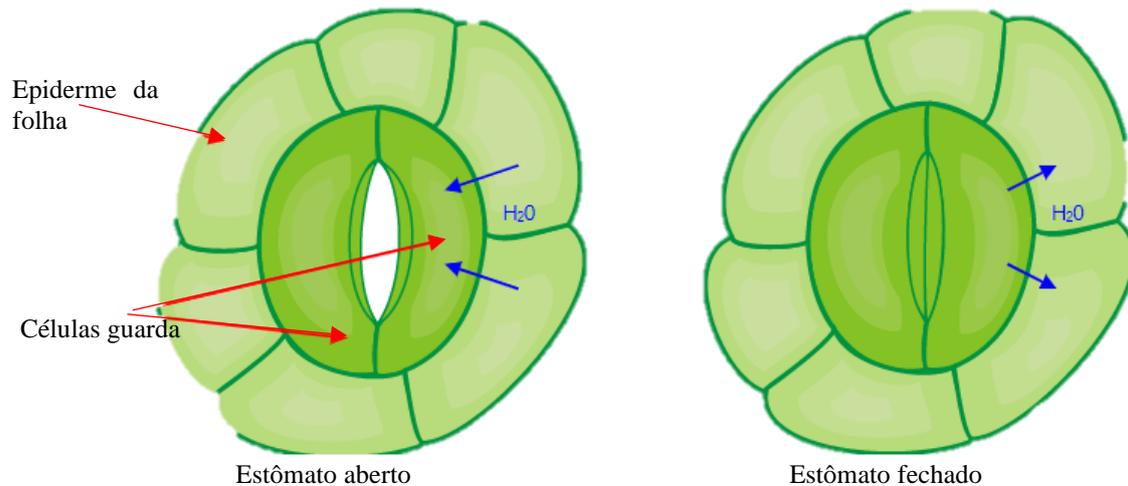


Figura 4. Abertura e fechamento dos estômatos

O movimento estomático é resultado de mudanças na pressão de turgor dentro das células-guarda, sendo que em plantas bem hidratadas, a luz é o sinal dominante no controle estomático. Em campo, os estômatos se abrem pela manhã na presença da luz solar e se fecham com a diminuição dos níveis luminosos (RAVEN; EVERT; EICHHORN, 2014).

O fechamento dos estômatos ocorre como resposta da planta a condições de déficit hídrico, baixa umidade do ar e/ou elevada temperatura do ar, buscando evitar a perda excessiva de água pelos tecidos vegetais. No entanto, como consequência desse comportamento pode haver redução do processo de fotossíntese. Além disso, com a redução da transpiração e consequente déficit hídrico verifica-se aumento na temperatura das folhas já que a vaporização de água na superfície das folhas contribui para resfriamento dessas superfícies.

A concentração de CO₂ também influencia o controle estomático, sendo que elevadas concentrações de CO₂ provocam o fechamento dos estômatos. O fechamento estomático previne a perda de vapor d'água pelas folhas, mas também impede a entrada de CO₂ que é essencial para a fotossíntese.

A evapotranspiração (*ET*) combina processos de evaporação e de transpiração, sendo influenciada principalmente por fatores climáticos como a velocidade do vento, a umidade do ar, temperatura do ar e radiação solar, além da espécie vegetal e estágio de desenvolvimento afetam diretamente a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998a). A movimentação contínua do ar atmosférico sobre a superfície terrestre mantém um processo no qual há a evaporação de água ou secamento de superfícies (PEREIRA et al., 1997). O poder evaporante do ar (demanda atmosférica) aumenta na medida em que a temperatura do ar e a velocidade do vento aumentam e a umidade relativa do ar diminui.

A evapotranspiração de referência (ET_0) é a quantidade de água utilizada por uma superfície vegetal padrão sob condições ideais e livres de restrições de qualquer natureza, sendo que o poder evaporante do ar (demanda atmosférica) é determinante nesse processo.

A evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}), também chamada de evapotranspiração máxima da cultura, é a quantidade de água utilizada por uma cultura em qualquer fase de seu desenvolvimento desde que não haja estresses de qualquer natureza. Já a evapotranspiração da cultura (ET_c) é aquela obtida em condições reais de cultivo, nas quais podem existir um ou mais fatores restritivos ao máximo desenvolvimento e transpiração da cultura.

Em condições de campo, é comum o uso de estações meteorológicas automáticas para monitoramento das variáveis meteorológicas, sendo que a evapotranspiração de referência é estimada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998b). Em condições de cultivo em ambiente protegido, há alterações nas variáveis mencionadas. A cobertura plástica atenua a radiação que penetra na estufa, havendo uma diversidade de plásticos e ainda questões de envelhecimento e acúmulo de poeira na cobertura da estufa. A existência de tela anti-afídeos nas laterais da estufa reduz o efeito de ventos. Em estufas de baixa tecnologia (não climatizadas) espera-se que a temperatura no ambiente de cultivo seja superior a temperatura externa. Desse modo, é evidente que as estimativas de necessidades hídricas das culturas realizadas para condições de campo podem não ser acuradas para condições de cultivo em ambiente protegido.

As interações ambientais dentro de uma estufa de cultivo são complexas, pois envolvem relações entre radiação solar, plantas, ar e vapor de água. De forma simplificada, a Figura 5 expressa essas principais relações.

2.6 Déficit de pressão de Vapor (DPV)

O déficit de pressão de vapor (DPV) agrupa efeitos de temperatura e umidade do ar, servindo como indicador de demanda atmosférica ou poder evaporante do ar. O DPV influencia a transpiração das plantas sendo calculado pela diferença entre a quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode reter a dada temperatura (pressão de saturação) e a quantidade atual de vapor d'água presente no ar (pressão atual de vapor), conforme Eq. 1.

$$DPV = e_s - e_a \quad (1)$$

Em que: DPV é o déficit de pressão de vapor (kPa); e_s é a pressão de saturação (kPa); e_a é a pressão atual de vapor (kPa).

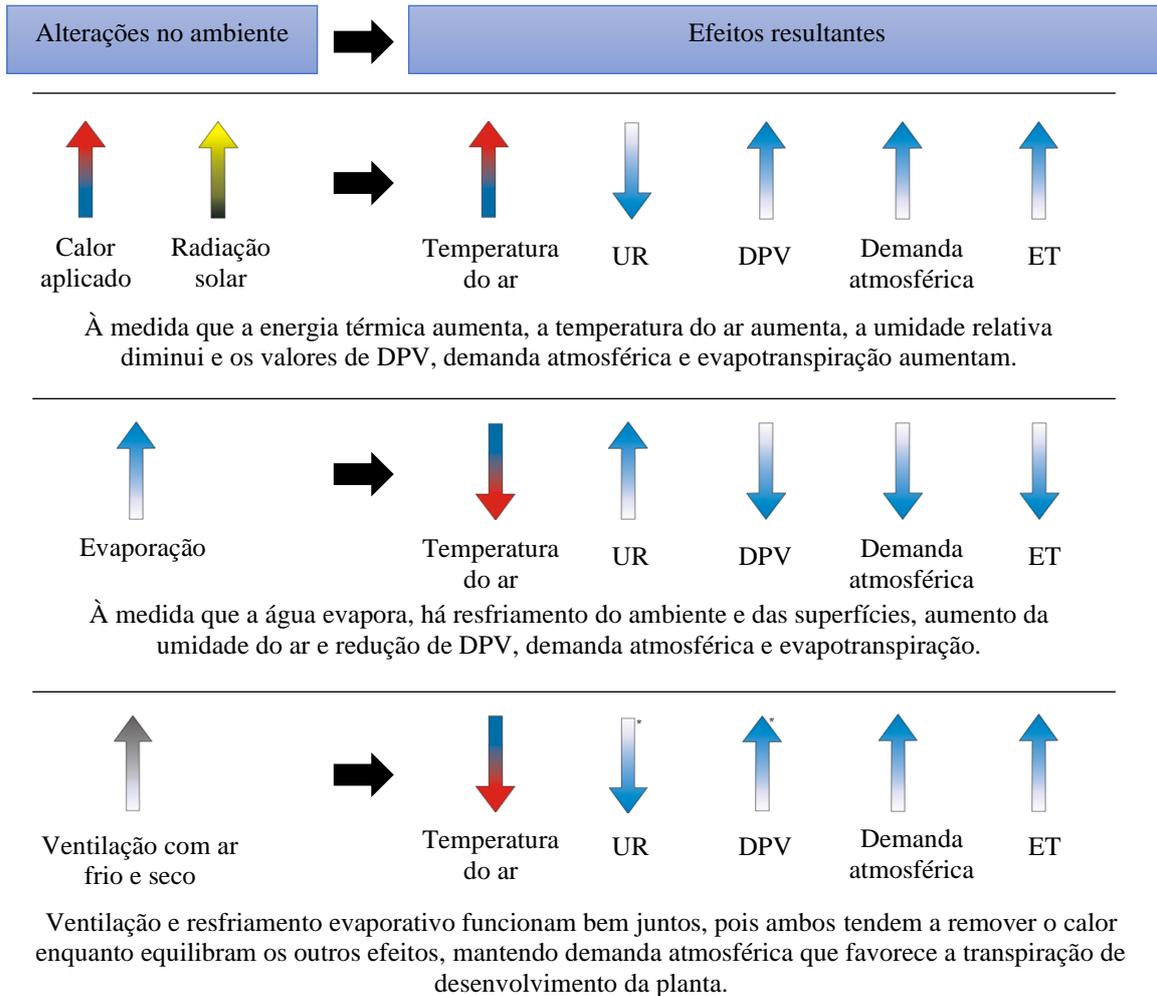


Figura 5. Relações ambientais dentro da estufa (adaptado de ARGUS, 2009)

Sob dada temperatura, a atmosfera pode reter uma quantidade máxima de vapor d'água, sendo esta condição denominada de pressão de saturação (e_s). O valor de e_s é função da temperatura do ar e pode ser calculado pela equação de Tetens (Eq. 2). Verifica-se na equação abaixo que quanto maior for a temperatura do ar, maior será o valor de e_s .

$$e_s = 0,6108 e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \quad (2)$$

Em que: T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

A quantidade de vapor d'água retida pela atmosfera em dado instante é denominada de pressão atual de vapor (e_a) sendo calculada pela Eq. 3.

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (3)$$

Em que: UR é a umidade relativa do ar (%).

A aplicação das equações acima permite construir gráficos conforme mostrado na Figura 6.

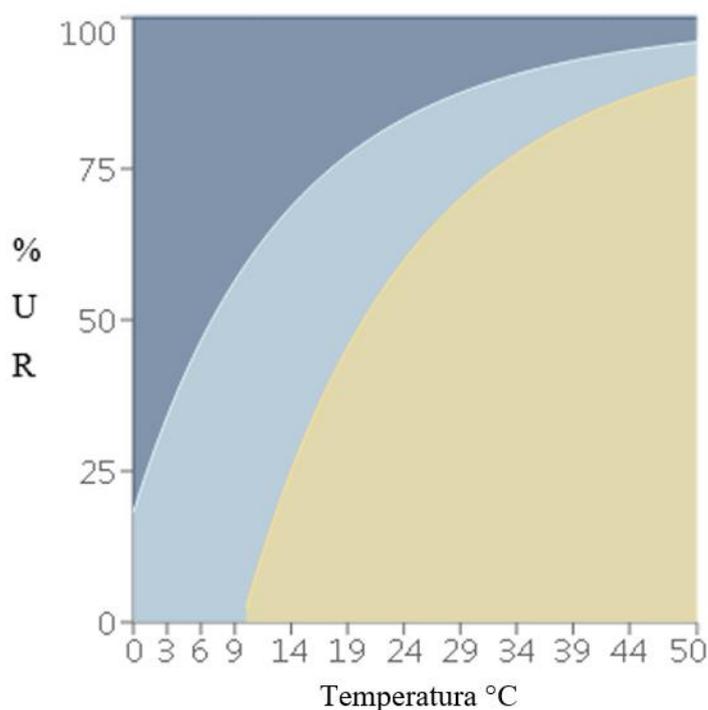


Figura 6. Ferramenta online para geração de gráfico de DPV (Adaptado de <https://www.omnicalculator.com/biology/vapor-pressure-deficit#what-is-vapor-pressure-deficit-DPV>)

DPV baixo indica baixa demanda atmosférica, o que pode ser desejável durante os estágios iniciais de desenvolvimento das plantas (STEWART; NIELSEN, 1990). Entretanto, valores muito baixos de DPV podem restringir a transpiração o que é indesejável (ARGUS, 2009). Em condições de DPV muito baixo, a transpiração é insuficiente para permitir o transporte de minerais em quantidade suficiente para as células vegetais em crescimento, mesmo que os estômatos estejam totalmente abertos.

Por outro lado, condições de ar muito seco e/ou temperaturas excessivas podem conduzir a valores elevados de DPV nos quais há maior risco de desidratação das plantas. Sob tais condições é esperado fechamento estomático, redução de trocas gasosas nas folhas, limitações na fotossíntese e no desenvolvimento da planta.

Valores ótimos de DPV para fins de controle climático em ambiente protegido são relatados na literatura (Tabela 2).

Tabela 2. Valores de DPV reportados na literatura

Faixa (kPa)	Descrição	Referência
0,5-1,2	Ideal para polinização e prevenção de doenças por fungos em culturas como tomate	(ZHANG et al., 2017)
0,2-1,2	Ideal para a maioria de cultivos em estufa	(ÇAYLI; BAYTORUN, 2021)
0,5-0,8	Ideal para a maioria dos cultivos em estufa	(BAKKER J, 1991)
0,5	Considerado ótimo	(WOLLAEGER, 2015)
0,65-1,6	Melhor faixa de transpiração em diversas cultivares	(NOH; LEE, 2022)

2.7 Manejo de irrigação

A determinação da quantidade de água necessária para as culturas constitui um dos principais requisitos para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação (BERNARDO et al., 2019). Em termos de manejo da irrigação, superestimar a irrigação necessária implica na aplicação de água ou solução nutritiva em excesso, acarretando aumento dos custos da irrigação e riscos ao ambiente e a cultura. Por outro lado, subestimar a demanda hídrica pode restringir a produtividade da cultura e agravar problemas de salinidade no meio de cultivo.

A quantidade de água consumida pelas culturas pode ser estimada com base em várias metodologias, sendo que as mais difundidas no meio agrícola são baseadas na determinação do conteúdo de água no solo de forma direta ou indireta, ou ainda em metodologias que estimam a evapotranspiração da cultura a partir de dados meteorológicos ou de lisimetria.

Existem ainda métodos baseados na medição de temperatura do dossel que permitem estimar o déficit hídrico da cultura, como é o caso do índice de estresse hídrico da cultura (CWSI). A temperatura do dossel pode ser monitorada por sensores infravermelho de temperatura ou ainda por imagens térmicas (BLAYA-ROS et al., 2020).

Nos cultivos em solo ou substrato, o momento de se efetuar a irrigação e a quantidade de água a ser aplicada são parâmetros governados por: condições climáticas do local; cultura e respectivo estágio fenológico; profundidade efetiva do sistema radicular; características físicas do meio de cultivo (solo ou substrato); e, pela umidade do solo ou substrato (ALBUQUERQUE;

DURÃES, 2008). A determinação do momento de efetuar-se a irrigação constitui um dos pontos mais importantes do manejo da irrigação.

2.8 Alface

A alface (*Lactuca sativa*) é a folhosa de maior produção e comércio a nível global. No Brasil, participa com 86,8 mil hectares cultivados por mais de 670 mil produtores, com produção de 575,5 mil toneladas (KIST et al., 2019). As variedades crespa, americana, lisa e romana fazem da alface a folhosa mais consumida no país (ECHER et al., 2016; IDRIS; SANI, 2012).

O volume de alface produzido no sistema convencional varia ao longo do ano, de acordo com as características climáticas regionais (ROVER; LUIZ BARCELOS OLIVEIRA; DA PENHA TEIXEIRA NAGAOKA, 2016). A maioria das cultivares de alface apresentam melhor desenvolvimento em ocorrência de temperaturas amenas, entre 15°C e 24°C, principalmente no período de crescimento vegetativo (PAULO HENZ; SUINAGA, 2009). Em calor extremo, a alface é propensa a murchar, o que ocorre quando a planta começa a entrar no estágio de floração. A alface que se pendoa torna-se amarga e não comercializável (PICKENS J.; WELLS D.; BLANCHARD C., 2022). Existem variedades mais resistentes a altas temperaturas, o que permite o cultivo de alface em todo o território brasileiro (MALDONADE, I. R; MATTOS, L. M; MORETTI, 2014).

Em campo aberto, a alface é cultivada no solo em sistemas de cultivo convencional ou orgânico. Em ambiente protegido, as condições reduzem oscilações ambientais, a incidência de pragas e doenças, podendo favorecer o desenvolvimento da cultura (ALVES et al., 2002). Além disso, em ambiente protegido, destaca-se o uso de sistemas NFT para a produção de alfaces. O crescimento da produção se deve, em partes, aos sistemas de cultivo em ambiente protegido e ao cultivo em sistema NFT, tecnologia que permitiu o cultivo e a oferta de produtos de boa qualidade em todas as estações do ano (LOPES; QUEZADO-DUVAL; REIS, 2010).

2.9 Parâmetros de qualidade de hortaliças folhosas

Qualidade é o conjunto de atributos e propriedades associados ao grau de excelência e superioridade de uma cultivar. Dentre os indicadores de qualidade de hortaliças folhosas,

destacam-se: massa fresca, pH, acidez total titulável (ATT), sólidos solúveis totais (SST) e índice de maturidade (Ratio).

2.9.1 Clorofila

A medição de clorofila é utilizada como método indireto para estimar os níveis de nitrogênio nas plantas (DE LIMA VASCONCELOS et al., 2014). Sob condições de déficit hídrico uma das respostas da planta é a redução das translocações de nitrogênio em vários órgãos da planta (XU; YU; WANG, 2006). Nessas condições foram relatadas reduções no teor de clorofila nas folhas em comparação com cultivos em condições de adequado suprimento hídrico (DIN et al., 2011).

2.9.2 Sólidos solúveis totais

A escala brix é usada no setor de alimentos para medir a quantidade de açúcares em sucos de frutas e é determinada pela concentração de sólidos solúveis totais (SST). Além disso, é usada para determinar a maturidade e o tempo de colheita, de forma que a determinação da maturidade é realizada com um refratômetro que quantifica SST em °brix (Figura 7).



Figura 7. Refratômetro manual

2.9.3 Acidez Total Titulável (ATT)

A Acidez Total Titulável determina a concentração total de ácidos contidos em um alimento. É determinada mediante a volumetria ácido-base e quantificada usando uma base de $NaOH$ 0,1N e fenolftaleína como indicador. A valoração ácido-base consiste na determinação

da concentração de um ácido ou de uma base mediante a adição de um volume medido de base ou ácido, de concentração conhecida, até atingir um ponto de equivalência. Esse ponto é o número equivalente da substância a titular, ou seja, igual a equivalentes da substância titulante.

$$V_{base} * N_{base} = N^{\circ} \text{ de equivalentes de base}$$

$$V_{ácido} * N_{ácido} = N^{\circ} \text{ de equivalentes de ácido}$$

$$V_{Base} * N_{base} = V_{Ácido} * N_{Ácido}$$

No ponto de equivalência, é gerado uma mudança forte do pH, o que possibilita a determinação desse ponto com um pHmetro. Para realizar essa medição, é preciso adicionar uma quantidade de suco (10ml) e água destilada a essa dissolução titulada com NaOH 0,1N até que mude o indicador ou chegue ao valor de pH 8,1 (DOMENE; SEGURA, 2014).

2.9.4 Índice de maturidade (*Ratio*)

O índice de maturidade (*Ratio* ou *flavor*) é um parâmetro indireto determinado com base na razão entre SST e ATT. Serve como indicativo da qualidade organoléptica do produto, além de permitir estimar o sabor do produto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições gerais de cultivo e módulos experimentais

Os experimentos foram conduzidos em uma estufa agrícola localizada no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP). As coordenadas geográficas do local são latitude 22°48'57" S, longitude 47°03'33" W e altitude média de 640 m. Campinas possui clima tropical de altitude (Cwa de acordo com a classificação de Koeppen), com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 20,7 °C. Os invernos são secos e amenos, enquanto os verões são chuvosos, com temperaturas moderadamente altas. O mês mais quente do ano (fevereiro) apresenta temperatura média de 23,4 °C, e o mais frio (julho) apresenta média de 17,2 °C (PANTANO; CAMPAROTTO; MEIRELES, 2021). Dados meteorológicos do ambiente externo foram obtidos da estação meteorológica de Campinas-Taquaral, disponível em base de dados online (<http://www.ciiagro.org.br/janeladofruticultor> e <https://mapas.inmet.gov.br/>).

A estufa agrícola na qual a presente pesquisa foi realizada apresenta cobertura plástica em polietileno, tela antiafídica nas laterais, abertura zenital e dimensões 6,40 x 18,00 x 2,20 m (Largura x Comprimento x Altura do pé direito) (Figura 8). Além disso, sobre a área de cultivo instalou-se tela termorefletora interna de 50% com a intenção de evitar temperaturas excessivas. As cortinas plásticas existentes nas laterais da estufa foram mantidas abertas durante todos os experimentos.



Figura 8. Estufa agrícola para a condução dos experimentos

Foram construídos quatro módulos para condução dos experimentos avaliando o cultivo de alface em aeroponia e um módulo para condução das plantas no sistema NFT (Figura 9).

Todos os módulos tinham capacidade para 15 plantas cultivadas no espaçamento de 20 cm. Cada módulo de aeroponia era uma caixa plástica de 372 L (caixa container), fabricada em polietileno na cor preta, totalmente opaca. A tampa plástica de cada caixa foi pintada de branco com o intuito de reduzir efeitos de temperatura próximo das plantas. Além disso, a tampa foi perfurada para acoplamento dos netpots (50 mm de diâmetro x 47 mm de altura), os quais foram empregados para a sustentação das plantas. A solução nutritiva foi compartilhada entre todos os módulos.

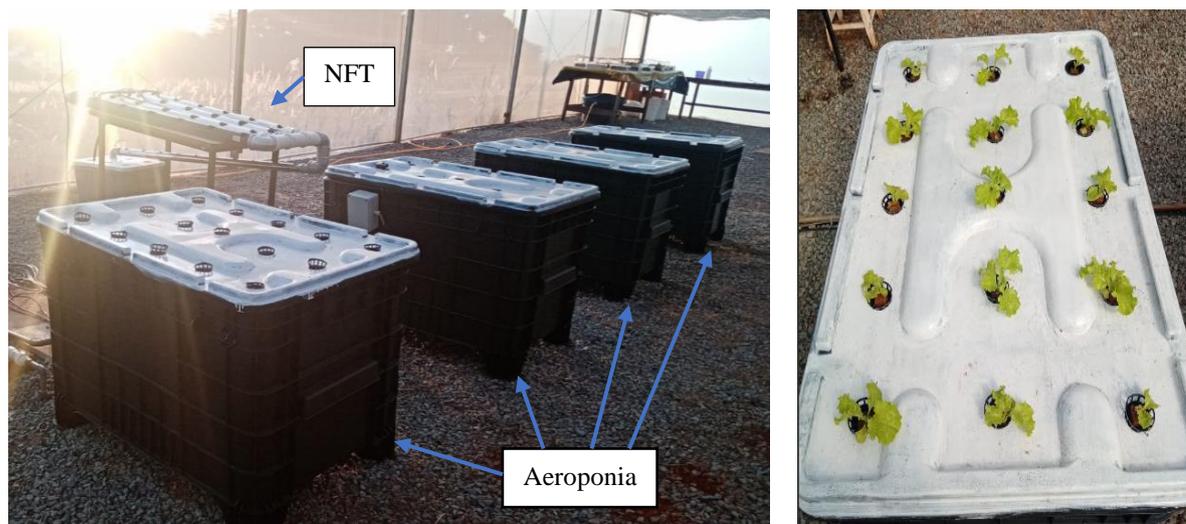


Figura 9. Módulos para condução dos experimentos em aeroponia e em sistema NFT

O módulo de NFT possuía tubos opacos de 75 mm de diâmetro contendo bomba e reservatório separados da aeroponia, embora a solução nutritiva fosse a mesma. A formulação da solução nutritiva empregada nos experimentos é apresentada na Tabela 3. O pH da solução foi mantido em $5,5 \pm 0,5$ e a condutividade elétrica em $1,8 \pm 0,3 \text{ dS m}^{-1}$. O monitoramento de pH foi realizado utilizando um medidor de pH portátil AKSO AK90 (erro e resolução de $\pm 0,1$) e de CE foi realizado com medidor portátil AKSO AK51 (faixa de medição 0,01 a 19,99 dS m^{-1} ; resolução de $0,01 \text{ dS m}^{-1}$; erro de 2% em relação ao fim de escala).

Tabela 3. Formulação utilizada no preparo da solução nutritiva de todos os tratamentos (FURLANI et al., 2009)

Fertilizante	Quantidade (mg L^{-1})
Nitrato de cálcio	700
Sulfato de Magnésio	350
Nitrato de Potássio	450
MKP	100
Conmicros Standard	20

Na aeroponia, a solução nutritiva foi pulverizada por bicos fabricados em material cerâmico, marca Jacto, modelo JCI 80 0050 (roxo), jato do tipo cone vazio, ângulo de aplicação

de 80°, faixa de operação de 60 a 300 PSI (413,7 a 2068,4 kPa) e diâmetro de orifício de 0,5 mm. A relação vazão-pressão do bico é apresentada na Tabela 4, sendo que esse bico produz gotas muito finas em toda a faixa de pressões recomendada. Nesta pesquisa definiu-se a pressão de operação de 105 PSI (1034,2 kPa), obtendo-se a vazão de 0,31 L min⁻¹ (18,6 L h⁻¹).

Tabela 4. Especificações do bico de pulverização Jacto modelo JCI 80 0050 (roxo)

Pressão (PSI)	Vazão (L min ⁻¹)	Tamanho de gotas
60	0,23	Muito fina (60 a 145 µm)
75	0,26	Muito fina (60 a 145 µm)
105	0,31	Muito fina (60 a 145 µm)
150	0,37	Muito fina (60 a 145 µm)
300	0,52	Muito fina (60 a 145 µm)

Adaptado de Jacto (2022b).

Foram instalados 10 bicos de pulverização em cada módulo de aeroponia, conforme disposição indicada na Figura 10, buscando aplicação uniforme no sistema radicular das plantas. Todos os bicos foram posicionados 10 cm abaixo da tampa e orientados para realizar a aplicação na direção do centro da caixa. A vazão necessária para cada módulo foi de 186 L h⁻¹.

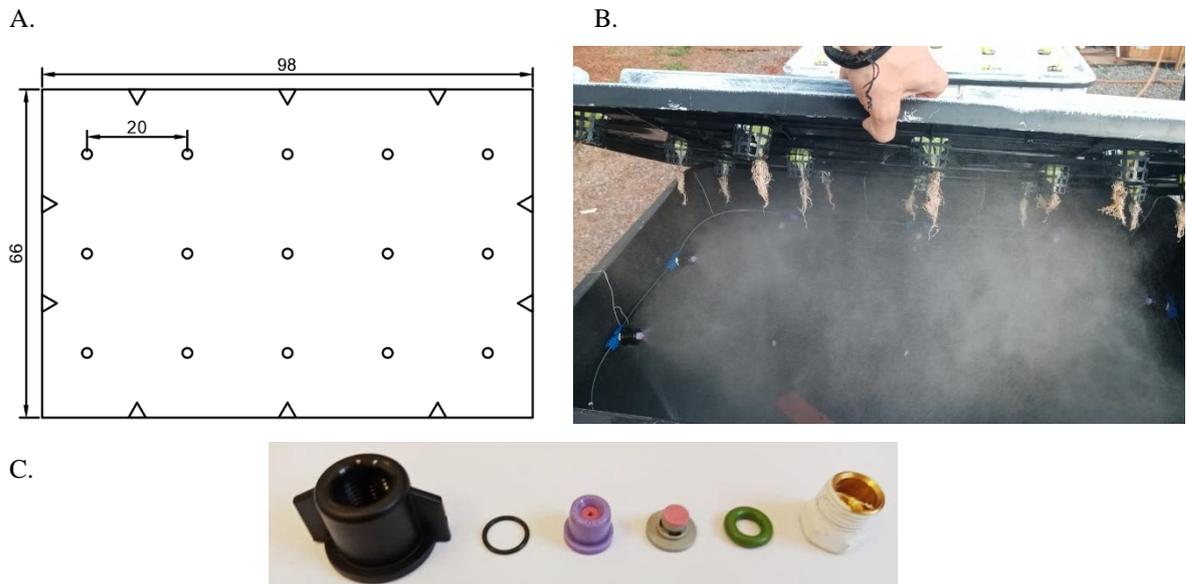


Figura 10. Disposição dos bicos e plantas no módulo de aeroponia (triângulos representam bicos e círculos representam plantas) (A e B); Peças para montagem dos bicos (C)

Montou-se um sistema hidráulicamente fechado e interligado para os módulos de aeroponia, equipado com: bomba centrífuga Schneider, multiestágios, modelo BT4-0505E7, 1/2CV; filtro de discos de 120 mesh (abertura de 125 µm); transdutor de pressão (faixa de 0 a 10 bar, incerteza de medição 0,5% em relação ao fundo de escala); válvulas solenoides ½”,

normalmente fechada, ação direta, 220 V; tanque adicional de 250 L equipado com unidade condensadora de 9000 BTU para controle de temperatura (resfriamento) da solução nutritiva; e, circuito eletrônico para aquisição de dados do transdutor de pressão e controle de válvulas (Figura 11).

O sistema de resfriamento foi capaz de manter a temperatura da solução sempre abaixo de 30 °C e mostrou-se obrigatório nas condições de cultivo avaliadas. Vale relatar que em experimentos preliminares sem esse sistema de resfriamento, a temperatura da solução atingiu valores próximos de 50 °C impedindo o desenvolvimento das plantas.

O circuito eletrônico para aquisição de dados do transdutor de pressão e controle de válvulas foi desenvolvido pela equipe do Laboratório de Hidráulica e Irrigação (LHI), tendo como componente principal o microcontrolador ESP32, cujas funções são: aquisição de dados de pressão, controle de válvulas, comunicação e transmissão de dados via Wifi. Esse circuito é parte de uma rede de IoT (Internet of Things) para monitoramento e controle em duas estufas agrícolas da FEAGRI.

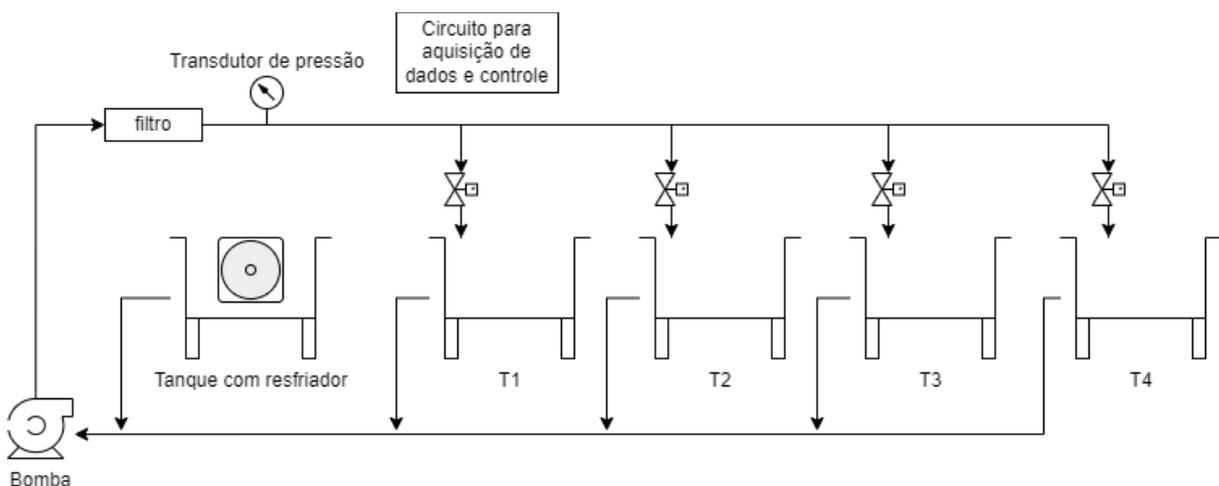


Figura 11. Esquema ilustrando os principais componentes dos módulos de aeroponia

3.2 Rede IoT para aquisição de dados, controle de atuadores e automação do experimento

Desenvolveu-se módulos eletrônicos interligados em uma rede IoT para aquisição de dados, controle de atuadores e automação de rotinas de irrigação no experimento (Figura 12). O componente central da rede foi uma placa Raspberry PI 4 que desempenhou a função de um computador. Essa placa foi conectada a rede cabeada de internet permitindo acesso remoto a todos os dados e dispositivos da rede IoT. Dados foram armazenados em um Sistema

Gerenciador de Banco de Dados MySQL. Essa placa também foi configurada como Access Point Wifi, permitindo a conexão de outros módulos microprocessados a rede IoT. A comunicação entre dispositivos na rede foi feita empregando o protocolo de comunicação MQTT.

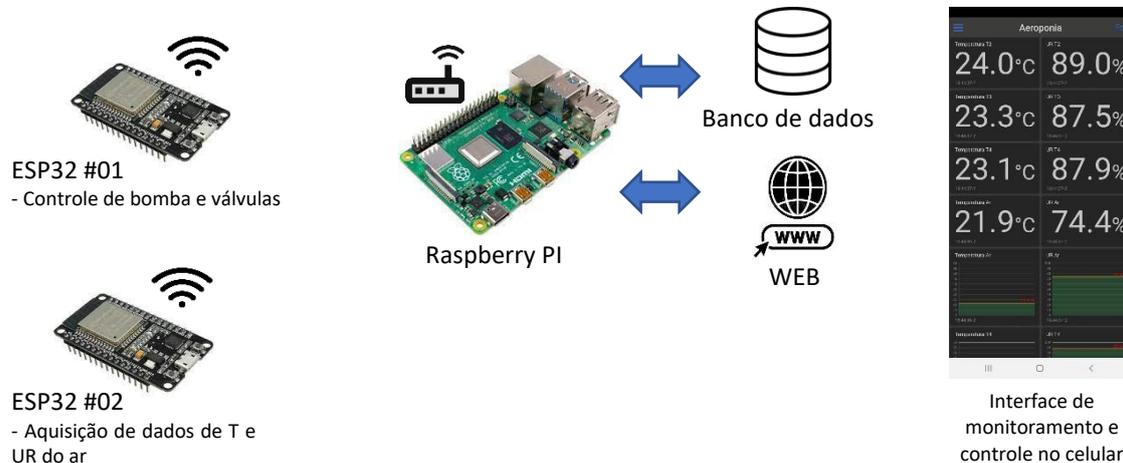


Figura 12. Rede IoT (Internet of Things) para aquisição de dados, controle de atuadores e automação do experimento

A aquisição de dados de sensores e o controle de atuadores foram realizados por módulos distribuídos na estufa, cujos componentes principais foram microcontroladores ESP32.

Desenvolveu-se um módulo (hardware e firmware) para controle da bomba e das válvulas (ESP32 #01), sendo que o acionamento dos atuadores foi realizado por relés eletromecânicos. Esse módulo sempre acionava os atuadores em resposta a requisições enviadas pelo aplicativo de controle executado no Raspberry PI, ou ainda, a requisições enviadas pelo aplicativo do celular no caso de necessidade de comando manual de atuadores.

A aquisição de dados de temperatura e umidade do ar foi feita pelo módulo ESP32 #02 e empregou o sensor SHT20 (encapsulamento IP65; comunicação I²C; UR do ar na faixa de 0 a 100% com erro de $\pm 3\%$ e resolução de 0,04%; temperatura do ar de -40 a 125 °C, erro de $\pm 0,3$ °C e resolução de 0,01 °C) (SHT20, 2022). O sensor SHT20 foi posicionado dentro de um abrigo de madeira, perfurado e sujeito a ventilação natural, a uma distância de 1 m acima das plantas.

Por fim, desenvolveu-se um aplicativo para automação de rotinas de irrigação no experimento e para registro de informações no banco de dados. Esse aplicativo foi desenvolvido em Javascript/NodeJS e executado no Raspberry PI. Valores de DPV acumulado para cada tratamento (T2, T3 e T4) eram calculados a cada 30 s. Ao atingir o valor acumulado definido para o tratamento, o sistema solicitava acionamento da irrigação, resetava a variável que

acumulava DPV e reiniciava a rotina. Embora a aquisição de dados fosse contínua, o registro de variáveis ambientais (temperatura do ar e UR do ar) no banco de dados foi programado para intervalos de 10 min.

3.3 Delineamento experimental

Buscando determinar o valor crítico de déficit de pressão de vapor acumulado (DPV_{acum}) no qual a irrigação deve ser efetuada e comparar condições de cultivo em aeroponia com sistema NFT, foi adotado delineamento inteiramente casualizado, caracterizado por 5 tratamentos: T1: sistema ligado 24 h/dia ($DPV_{acum} = 0$ kPa.h); T2: irrigar quando $DPV_{acum} = 2,0$ kPa.h; T3: irrigar quando $DPV_{acum} = 3,5$ kPa.h; T4: irrigar quando $DPV_{acum} = 5,0$ kPa.h; T5: cultivo no sistema NFT ligado 24 h/dia. O tratamento em sistema NFT (T5) foi incluído com a intuito de servir como referência, já que esse sistema é usual no cultivo de folhosas em ambiente protegido. Além disso, foram realizados três ciclos de cultivo.

A escolha dos níveis de DPV_{acum} foi realizada analisando dados de um dia com elevadas temperaturas dentro da estufa e simulando o número de irrigações correspondentes a cada nível. Para essa simulação, observou-se que $DPV_{acum} = 2,0$ kPa.h apresentou eventos de irrigação com intervalos próximos de 30 min (alta frequência), enquanto $DPV_{acum} = 3,5$ kPa.h ocorreu entre 30 a 45 min e $DPV_{acum} = 5,0$ kPa.h as irrigações foram realizadas a cada 60 min (baixa frequência), aproximadamente. Uma vez atingido o valor de DPV_{acum} correspondente ao tratamento, a pulverização era acionada com uma duração fixada em 5 min, conforme proposto por Tunio et al. (2021).

As mudas de alface cultivadas em substrato foram adquiridas com um fornecedor local, sendo avaliada sempre a variedade Vanda da Sakata. Em experimentos preliminares verificou-se a necessidade de aclimação das plantas cultivadas em aeroponia nos primeiros 7 dias após o transplante, sendo que isso foi necessário para estimular o desenvolvimento radicular das plantas sem condicionar déficit que pudesse prejudicar as plântulas. Neste período de 7 dias, a irrigação em todos os tratamentos com aeroponia (T1, T2, T3 e T4) era acionada simultaneamente, sempre que o DPV acumulado atingia 1,5 kPa.h. O valor adotado de DPV acumulado foi definido para propiciar irrigações bastante frequentes e que não induzissem déficit hídrico às plantas jovens. Além disso cada evento de irrigação tinha duração de 5 minutos. No tratamento T5 (sistema NFT) não foi adotada essa rotina de aclimação, sendo

que o fornecimento de solução foi mantido acionado 24 h/dia desde a data de transplântio. Após o período de aclimação, realizou-se a diferenciação dos tratamentos (Figura 13).

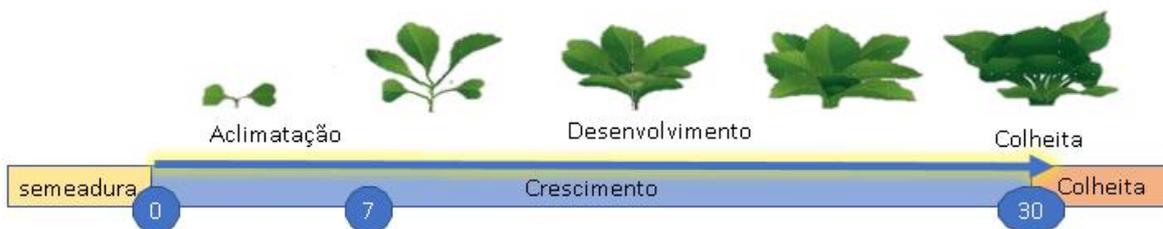


Figura 13. Etapas do cultivo

3.4 Indicadores de desenvolvimento das plantas

Para comparação de tratamentos, foram realizadas as seguintes determinações na data da colheita: massa fresca da planta; número de folhas por planta; área de projeção do dossel; diâmetro da planta; área lateral de raízes; clorofila; acidez total titulável (ATT); sólidos solúveis totais (SST); e, índice de maturidade ou flavor. Para as variáveis massa fresca, número de folhas, ATT, SST e índice de maturidade foram avaliadas 5 plantas por tratamento. Para as demais variáveis foram avaliadas 3 plantas por tratamento.

As determinações de massa fresca total da planta, incluindo raízes, foram realizadas em balança digital (faixa de medição de 0 a 5 kg, com resolução de 0,01 g). O número de folhas por planta foi obtido por contagem manual.

Os níveis de clorofila nas folhas foram estimados por medições com o instrumento SPAD 502 (Figura 14), que avalia a intensidade do verde da folha medindo as transmissões de luz de 650 nm a 940 nm, sendo esses os limites de absorção de luz pela molécula da clorofila (SPECTRUM TECHNOLOGIES INC, 2009; TORREALBA DE GIL et al., 2002).



Figura 14. Medidor de clorofila SPAD 520.

$$ATT = \frac{V_{NaOH} N Eq}{m 10} \quad (4)$$

Em que: ATT = acidez total titulável (mg/100mL); N = normalidade da solução = 0,1 M; V_{NaOH} = volume gasto da solução de NaOH 0,1M (mL); m = massa da amostra (g); Eq = equivalente-grama do ácido orgânico predominante na amostra (ácido cítrico = 64).

Paralelamente foi determinado o SST por leitura direta no extrato líquido com o uso de um refratômetro (Atago Nseries 210-w02), cuja leitura é indicada em °Brix. O índice de maturidade (flavor) foi calculado dividindo-se SST por ATT.

As seguintes variáveis foram determinadas a partir do processamento de imagens: área de projeção do dossel (vista de topo), diâmetro da planta (vista de topo) e área lateral de raízes. A aquisição de imagens foi realizada manualmente utilizando câmera de 13 MegaPixels integrada em celular. Montou-se um pequeno estúdio (Figura 15) para melhorar condições de iluminação e favorecer a aquisição de imagens padronizadas, a fim de facilitar comparações. Uma régua graduada foi fixada no estúdio para ajuste de escala das imagens. Foram adquiridas imagens de 3 plantas por tratamento aos 10, 14, 17, 20, 25 e 30 DAT.

Utilizou-se o aplicativo Snapseed para melhoria da qualidade das imagens, particularmente da luminosidade e contraste. Na sequência, o processamento das imagens com o intuito de obter características dimensionais foi feito utilizando o aplicativo ImageJ (versão 1.8). A segmentação das imagens foi realizada de modo semi-automático utilizando uma mesa digitalizadora Wacom Intuos BT.



Figura 15. Estúdio para aquisição de imagens

As Figura 16 e 17 ilustram etapas do processamento de imagens da parte aérea e de raízes no software Image J.

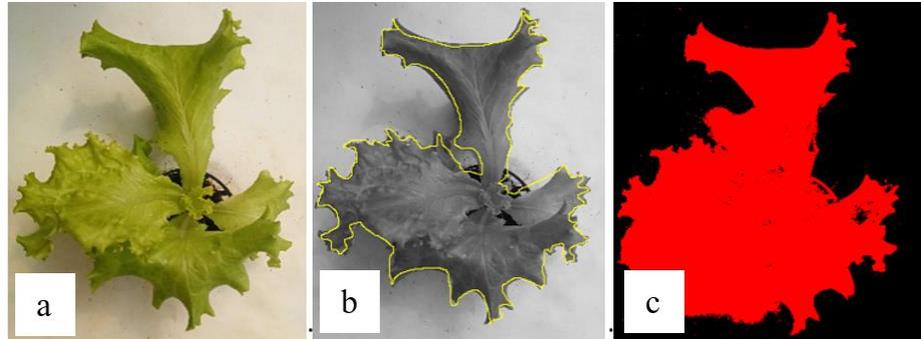


Figura 16. Processamento de imagens da parte aérea: (a) imagem original (b) imagem em escala de cinza (c) imagem segmentada

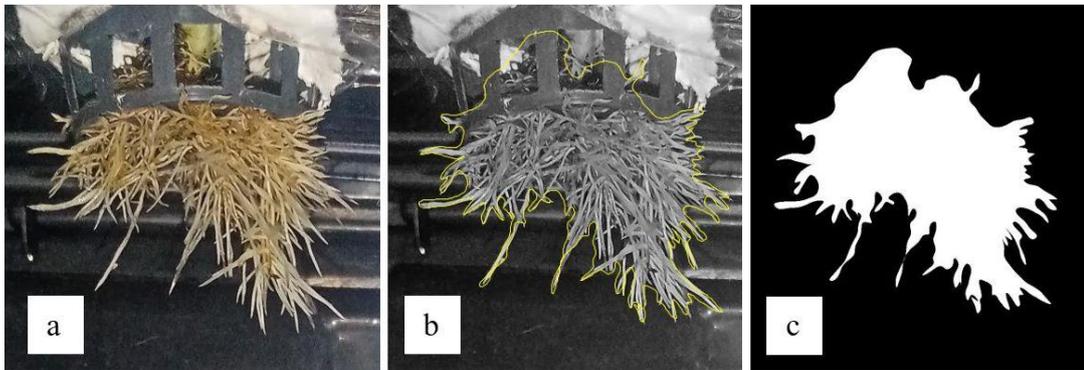


Figura 17. Processamento de imagens do sistema radicular: (a) imagem original (b) imagem em escala de cinza (c) imagem segmentada

Além dos indicadores de desenvolvimento das plantas, foram registradas as quantidades de água consumidas ao longo dos ciclos de cultivo.

3.5 Análise de dados

Condições meteorológicas dentro e fora da estufa, pH e CE da solução nutritiva são variáveis que foram monitoradas durante o experimento sendo apresentados resultados na forma de gráficos e tabelas acompanhados de indicadores estatísticos de tendência central e dispersão.

Os indicadores de desenvolvimento das plantas (tópico 3.4) foram tabulados e submetidos a testes estatísticos para comparação entre tratamentos. O teste de Grubbs foi empregado para identificação de eventuais valores extremos nos conjuntos de dados de cada uma das variáveis dependentes, sendo que eventuais valores discrepantes foram corrigidos

adotando-se a média de valores próximos no conjunto de dados. O teste de Bartlett foi utilizado para avaliar a homoscedasticidade (homogeneidade de variâncias) dos dados. O teste de Shapiro-Wilk foi empregado para avaliar a normalidade dos dados. Quando os pressupostos para a realização da Análise de Variância (ANOVA) foram atendidos, a comparação entre médias foi realizada por ANOVA seguida por Teste de Tukey. Quando algum dos pressupostos não foi atendido, a análise de dados foi efetuada utilizando o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com correção de Bonferroni. Adotou-se nível de significância de 5% nos testes estatísticos. Utilizou-se o Action Stat, que é um complemento do Excel para realização de todas as análises estatísticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições meteorológicas durante o cultivo

Dados de temperatura do ar foram monitorados dentro e fora da estufa durante os ciclos de cultivo (Figura 18). Observa-se que os valores mínimos e médios registradas foram similares dentro e fora do ambiente de cultivo, entretanto os valores máximos diferiram consideravelmente, sendo que as máximas diárias no ambiente interno foram em média 7,9 °C superiores àquelas observadas no ambiente externo. Tais valores são justificados pela altura da estufa, de apenas 2,2 m de pé-direito. Sabe-se que temperaturas elevadas são estresses abióticos que podem provocar desestabilização de membranas e proteínas, inibição fotossintética e respiratória e morte celular (TAIZ et al., 2017). Apesar das temperaturas elevadas do ambiente, a temperatura da solução nutritiva foi mantida abaixo de 30°C, sendo que as plantas se desenvolveram adequadamente durante os experimentos.

Na Figura 19 é mostrada a variação da umidade relativa do ar dentro e fora do ambiente de cultivo, observando mínimas, médias e máximas similares dentro e fora do ambiente de cultivo. Tais valores são justificados pelo fato de que a área da estufa é relativamente pequena (6,40 x 18,00 m) e há ventilação natural suficiente para manter certo equilíbrio entre a UR dentro e fora da estufa. Embora haja uma diversidade de cultivares aplicáveis a inúmeras condições, a recomendação geral é que as temperaturas do ambiente não sejam inferiores a 6°C e não ultrapassem 30 °C, sendo que a faixa ideal de UR varia de 60 a 80% (MARTINEZ, 2017).

Dados meteorológicos diários de radiação global (R_g) e evapotranspiração de referência (ET_0) foram obtidos da estação meteorológica de Campinas-Taquaral (Figura 20). Os valores médios de radiação global foram 9,9, 9,7 e 10,4 MJ m⁻² dia⁻¹ nos ciclos 1, 2 e 3, respectivamente. A média da ET_0 foi de 4,5, 4,2 e 3,6 mm dia⁻¹ nos ciclos 1, 2 e 3, respectivamente. Os dados meteorológicos apresentados indicam similaridade das condições ambientais nos ciclos de cultivo.

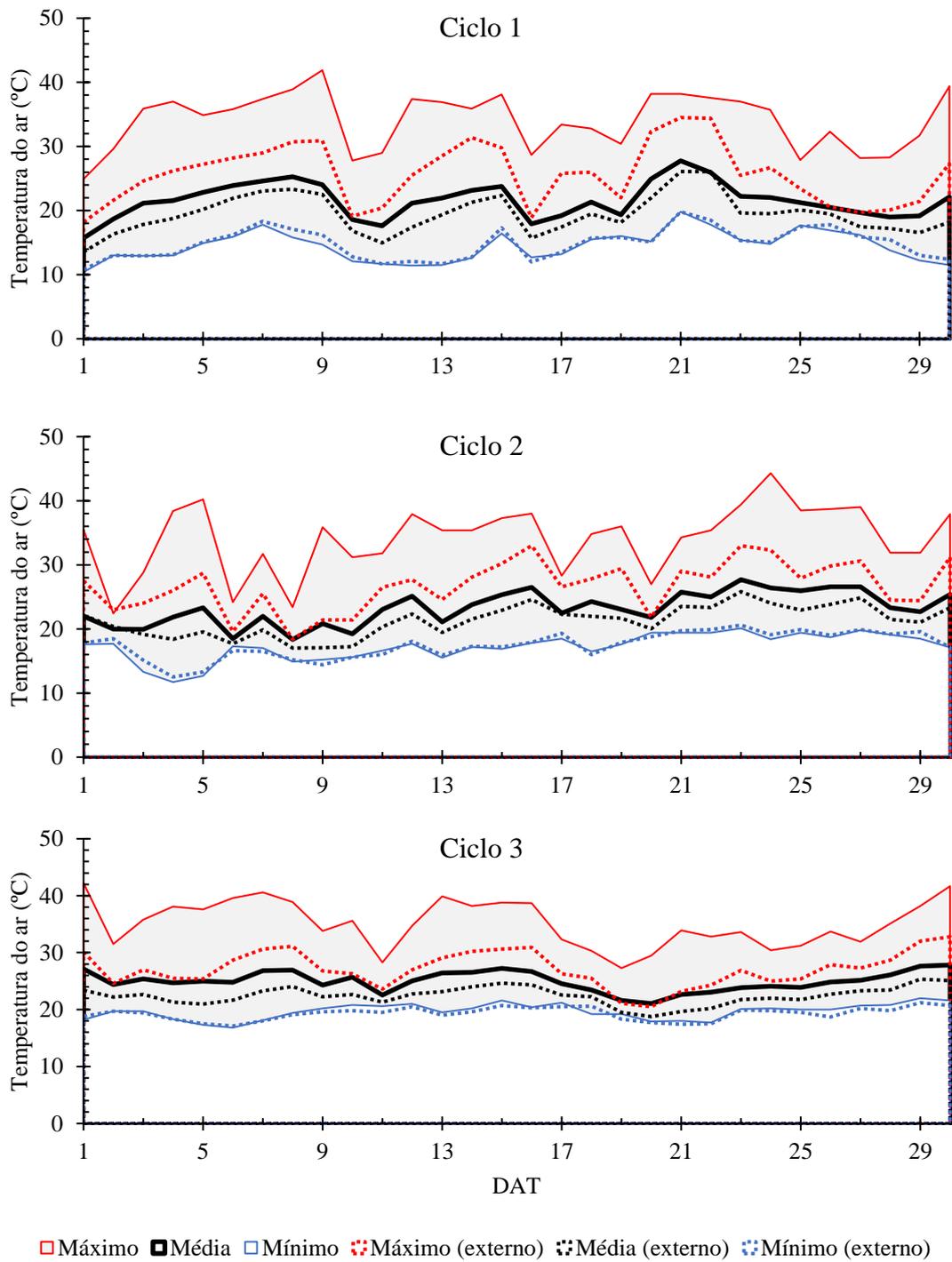


Figura 18. Dados de temperatura do ar (máxima, média e mínima) dentro e fora do ambiente de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)

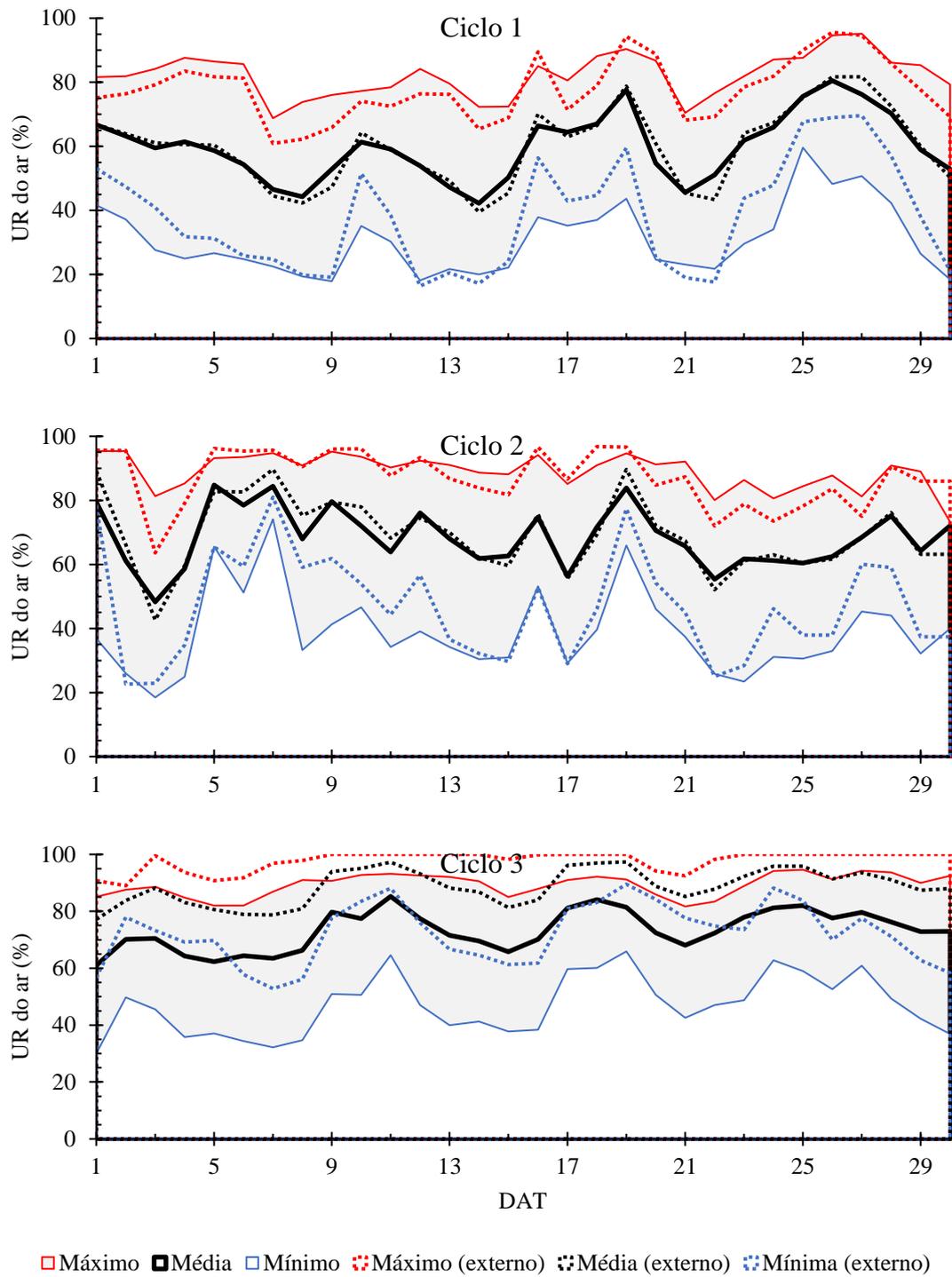
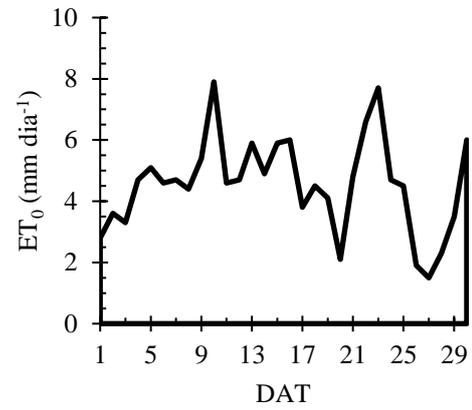
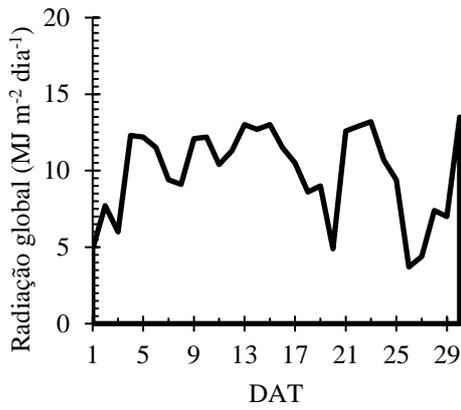
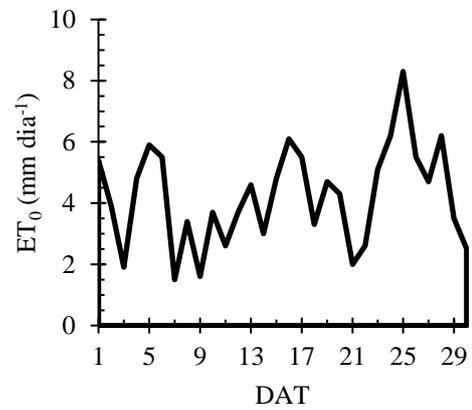
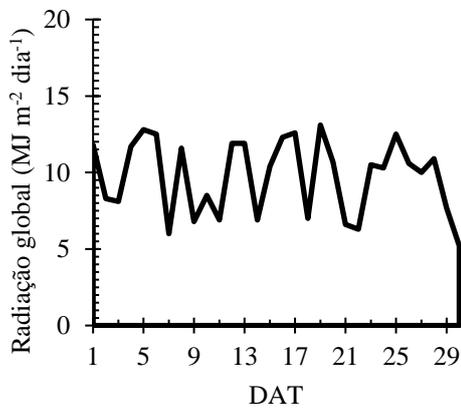


Figura 19. Dados de umidade relativa do ar (máxima, média e mínima) dentro e fora do ambiente de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)

Ciclo 1



Ciclo 2



Ciclo 3

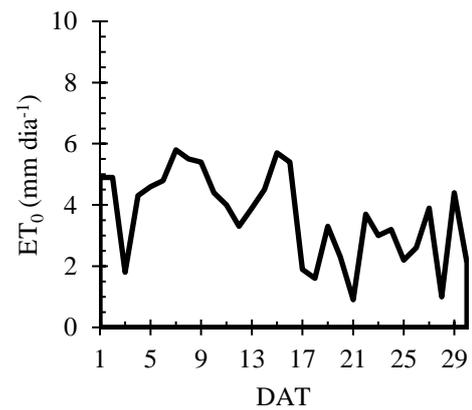
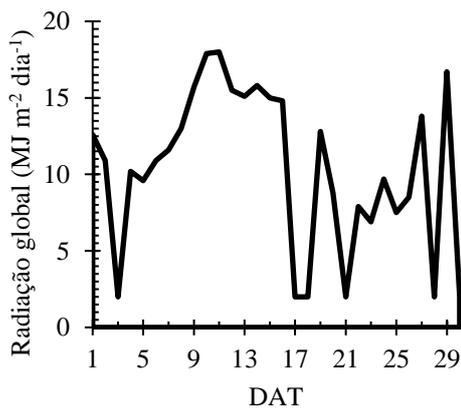


Figura 20. Dados diários de radiação global e evapotranspiração de referência fora do ambiente de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)

4.2 Solução nutritiva

Os valores de pH e CE da solução nutritiva foram medidos diariamente e corrigidos sempre que necessário pela adição de solução nutritiva concentrada. O pH da solução foi mantido em $5,5 \pm 0,5$ e a condutividade elétrica em $1,8 \pm 0,3 \text{ dS m}^{-1}$ (Figura 21). Flutuações no pH e CE da solução nutritiva são esperadas já que as plantas absorvem mais água do que nutrientes e, por esse motivo, a reposição de água seguida pelo monitoramento e correção de pH e CE precisa ser realizado diariamente.

A literatura indica que a faixa ideal de pH em sistemas de cultivo sem solo varia de 5,5 a 6,5 (MARTINEZ, 2017), sendo aceitáveis valores acima de 4,5 (FURLANI et al., 2009). Já valores de pH abaixo de 4,0 danificam membranas celulares e acima de 7,0 limitam a disponibilidade de nutrientes podendo induzir a deficiência de Fe, P, B e Mn (FURLANI et al., 2009; MARTINEZ, 2017). Para o cultivo de folhosas, há recomendações gerais de que a condutividade elétrica da solução deve ser mantida entre 1,5 e 2,5 dS m^{-1} , adotando-se valores menores em períodos quentes e maiores em períodos frios (SAVAZAKI et al., 2018).

Os volumes de solução nutritiva consumidos nos ciclos de cultivo 1, 2 e 3 foram 435, 440 e 393 L, respectivamente. Como os tanques de solução eram interligados, não é possível realizar estimativas de produtividade da água comparando os tratamentos.

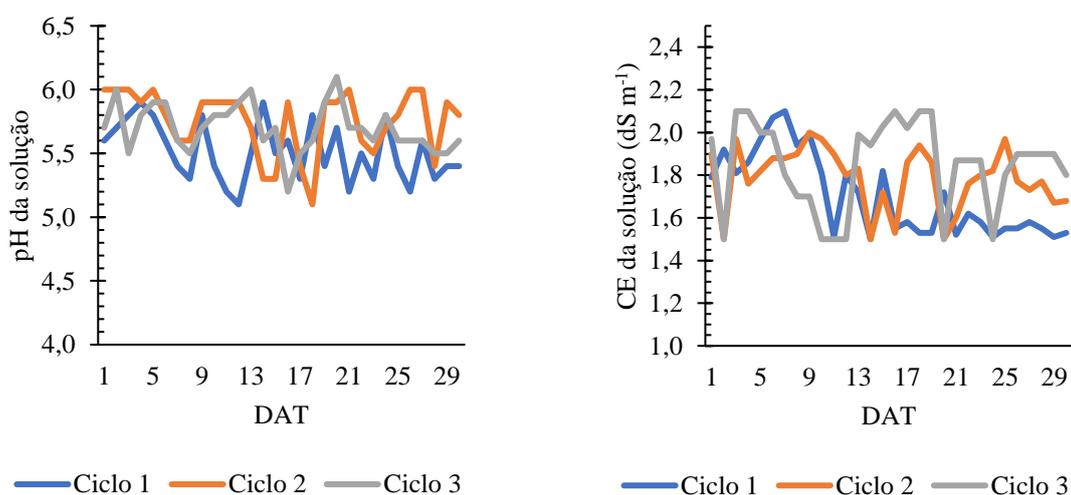


Figura 21. Variação de pH e condutividade elétrica da solução nutritiva nos ciclos de cultivo (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)

4.3 Manejo da irrigação

A Figura 22 apresenta o número de irrigações por dia nos tratamentos T2, T3 e T4, e valores diários de déficit de pressão de vapor acumulado. Dados dos tratamentos T1 e T5 não são aplicáveis já que o sistema foi mantido ligado 24 h/dia nessas condições. Durante os primeiros 7 dias realizou-se aclimação das plantas, sendo que o número de irrigações foi o mesmo em todos os tratamentos e isso também inclui T1. Nos experimentos preliminares em que não foi realizada essa aclimação, verificou-se crescimento radicular pouco vigoroso. A possível justificativa é que o intervalo entre irrigações condicionado pelos tratamentos T2, T3 e T4 provocou estresse hídrico suficiente para comprometer o desenvolvimento de raízes das plântulas recém transplantadas. Além disso a Figura 22 evidencia que o sistema automatizado operou conforme esperado ao longo dos ciclos de cultivo já que o número diário de irrigações seguiu a tendência de valores diários de DPV acumulado.

A Tabela 5 apresenta o número de irrigações e os tempos de operação nos ciclos de cultivo realizados. Os ciclos tiveram duração fixada em 30 dias, sendo que o tempo de operação de T1 e T5 foi de 720 h em cada ciclo. Os indicadores mostrados evidenciam o benefício energético ao adotar critérios de manejo de irrigação ao invés de simplesmente manter o sistema acionado 24 h/dia. Mesmo no tratamento T2, em que as irrigações são frequentes, a redução no tempo de operação do sistema foi de 94,0%, 89,9% e 95,2% nos ciclos 1, 2 e 3, respectivamente. Destaca-se que essas reduções no tempo de operação têm relação direta com os custos operacionais de energia elétrica para pressurização do sistema de irrigação. Além disso foi observado maior número de eventos de irrigação no ciclo 2, o que é explicado pela maior demanda atmosférica esse ciclo. Já o menor número de irrigações foi observado no ciclo 3, o que se justifica pela alta incidência de precipitações características do clima local no período entre dezembro e janeiro (verão chuvoso).

A Figura 23 apresenta dados de um dia selecionado (13/10/2022) no ciclo 2 por apresentar elevada demanda atmosférica e irrigações frequentes. Para qualquer dos tratamentos, evidencia-se maior número de irrigações das 08:00 as 18:00, havendo irrigações ainda mais frequentes nos horários de maior DPV. No período diurno observa-se valores instantâneos de DPV variando de 1 a 5 kPa, evidenciando condições ambientais bastante desfavoráveis para a planta. Conforme mostrado na Tabela 2, valores instantâneos de DPV dentro da estufa são considerados adequados na faixa de 0,5 a 1,5 kPa (ZHANG et al., 2017; ÇAYLI; BAYTORUN, 2021; BAKKER J, 1991; WOLLAEGER, 2015; NOH; LEE, 2022). O estresse térmico afeta

um amplo espectro de processos fisiológicos, sendo que a demanda atmosférica excessiva conduz a desidratação celular, fechamento estomático e redução de atividades celulares e metabólicas (TAIZ et al., 2017).

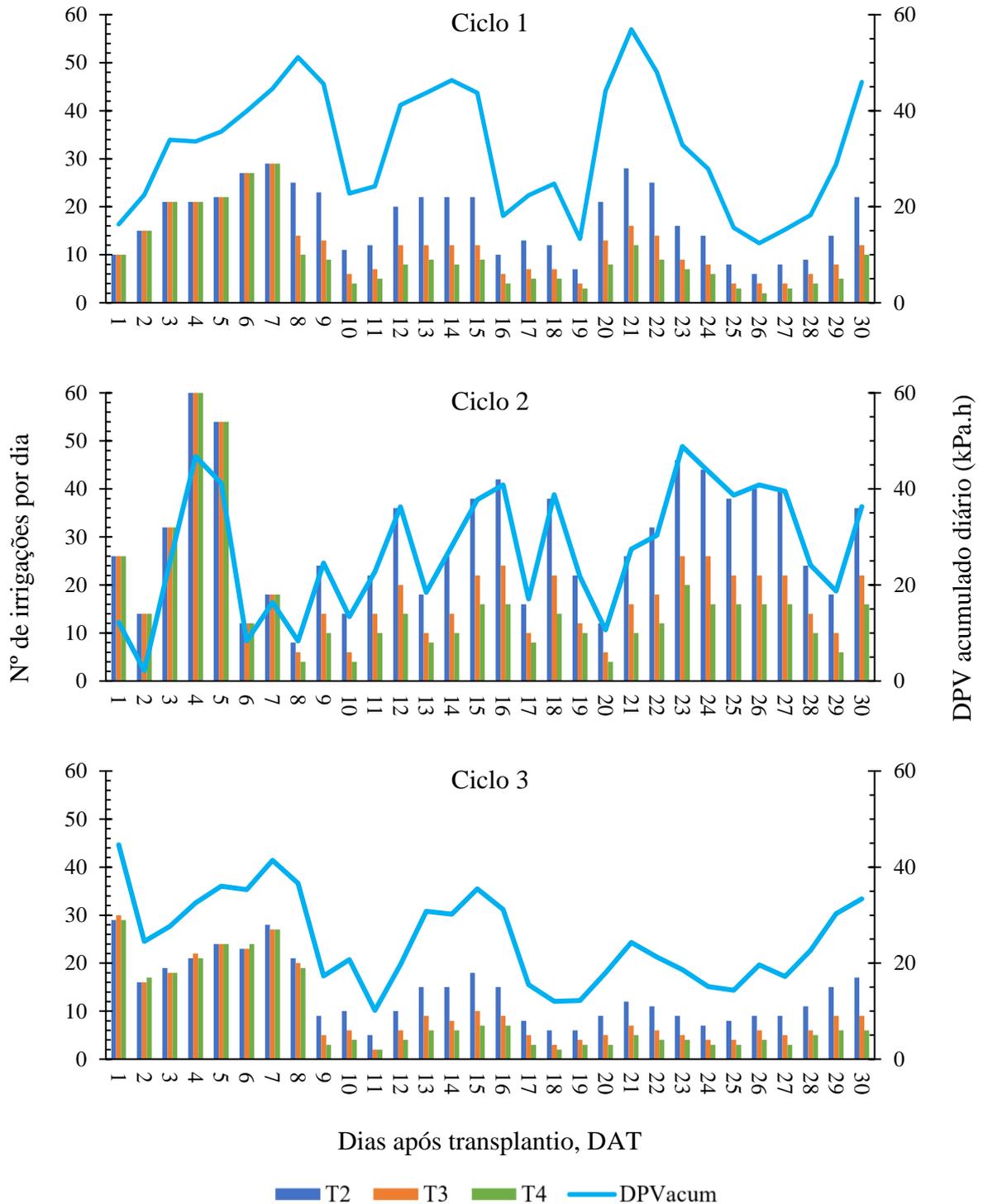


Figura 22. Número de irrigações por dia nos tratamentos T2, T3 e T4, e déficit de pressão de vapor acumulado a cada dia do experimento (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)

Tabela 5. Número de irrigações e tempos de operação nos ciclos de cultivo

Ciclo	Tratamento	Nº de irrigações no ciclo	Nº médio de irrigações por dia	Horas de operação no ciclo	% de redução no tempo de operação
1	T1	--	--	720	0.0
	T2	515	17.2	42.9	94.0
	T3	355	11.8	29.6	95.9
	T4	293	9.8	24.4	96.6
	T5	--	--	720	0.0
2	T1	--	--	720	0.0
	T2	876	29.2	73.0	89.9
	T3	594	19.8	49.5	93.1
	T4	482	16.1	40.2	94.4
	T5	--	--	720	0.0
3	T1	--	--	720	0.0
	T2	415	13.8	34.6	95.2
	T3	313	10.4	26.1	96.4
	T4	272	9.1	22.7	96.9
	T5	--	--	720	0.0

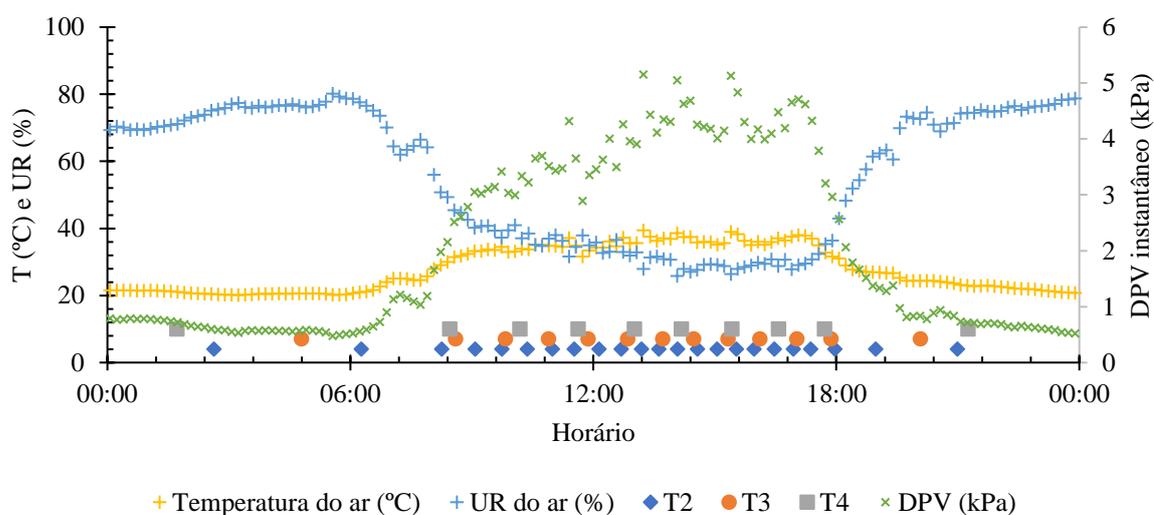


Figura 23. Dados de temperatura e umidade do ar em 13/10/2022 acompanhados de horários de irrigações nos tratamentos T2, T3 e T4

A Figura 24 apresenta o número de irrigações por dia nos tratamentos T2, T3 e T4, e também dados diários de ET_0 fornecidos pela estação meteorológica de Campinas. É possível observar que nem sempre o número de irrigações seguiu a tendência de valores diários de ET_0 conduzindo a questionamentos sobre a correlação entre DPV e evapotranspiração de referência. Sabe-se que a ET_0 é função da radiação global, vento, umidade relativa e temperatura do ar sendo determinada em campo aberto e sob condições padronizadas. No ambiente protegido o efeito de ventos é atenuado principalmente pela tela antiafideo instalada nas laterais da estufa e

a radiação global e a temperatura do ar sofrem interferência da cobertura plástica. Desse modo, é possível que as estimativas de ET_0 não sejam plenamente representativas e válidas para condições de cultivo em ambiente protegido (RAHIMIKHOOB; SOHRABI; DELSHAD, 2020).

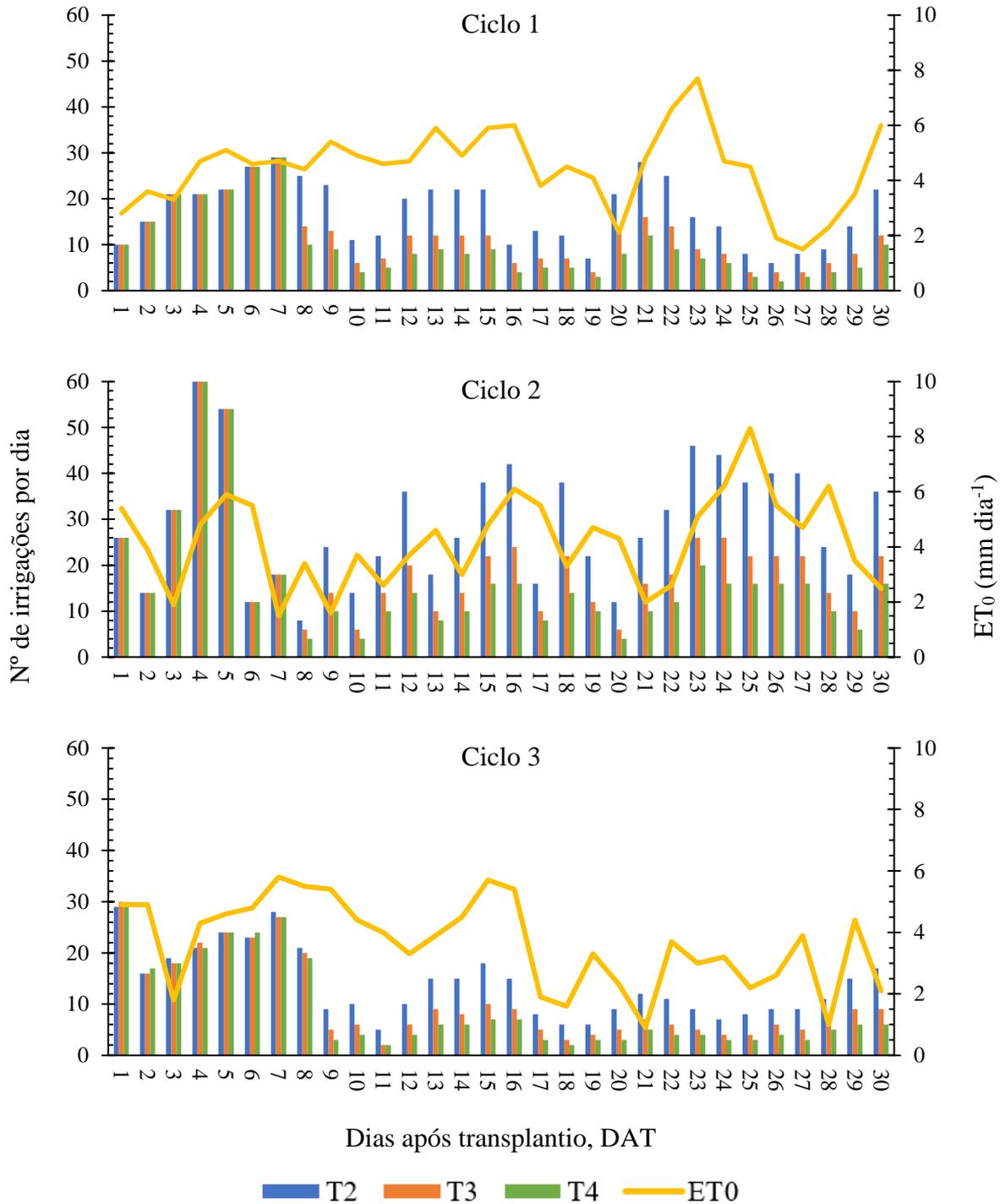


Figura 24. Número de irrigações por dia nos tratamentos T2, T3 e T4, e Evapotranspiração de referência no ambiente externo (ET_0) (Ciclo 1: 20/08 a 18/09/2022; Ciclo 2: 21/09 a 20/10/2022; Ciclo 3: 18/12/2022 a 16/01/2023)

4.4 Desenvolvimento vegetal

A Figura 25 ilustra algumas das plantas cultivadas, evidenciando diferenças de desenvolvimento vegetativo que são perceptíveis visualmente. Plantas cultivadas em sistema NFT (T5) foram visualmente similares aquelas conduzidas no tratamento T1 (aeroponia ligada 24 h/dia). Resultados semelhantes são relatados na literatura ao comparar cultivos em substrato, sistema NFT e aeroponia, evidenciando que o meio e o sistema de cultivo interferem no desenvolvimento das plantas (LI et al., 2018b).

Para as variáveis área de projeção do dossel (vista de topo), diâmetro médio das plantas (vista de topo) e área de raízes, foram realizadas capturas de imagens aos 10, 14, 17, 20, 25 e 30 DAT. As Figura 26, 28 e 29 indicam curvas de desenvolvimento das plantas com diferenciação entre tratamentos visíveis a partir da segunda semana após o transplântio. A área de projeção e diâmetro de plantas apresentou aumento mais vigoroso nos tratamentos T1 e T5, sendo que o esse aumento foi menos expressivo nos demais tratamentos, particularmente no T4 submetido aos níveis mais severos de déficit hídrico.

A Tabela 6 agrupa os resultados de indicadores de desenvolvimento vegetal e produção nos ciclos de cultivo avaliados e permite a comparação entre os tratamentos.

A Figura 28 mostra que o crescimento radicular é severamente afetado nos tratamentos T3 e T4. Nesses tratamentos observou-se morte de raízes em função do intervalo longo entre rotinas de irrigação, limitando o desenvolvimento das plantas.

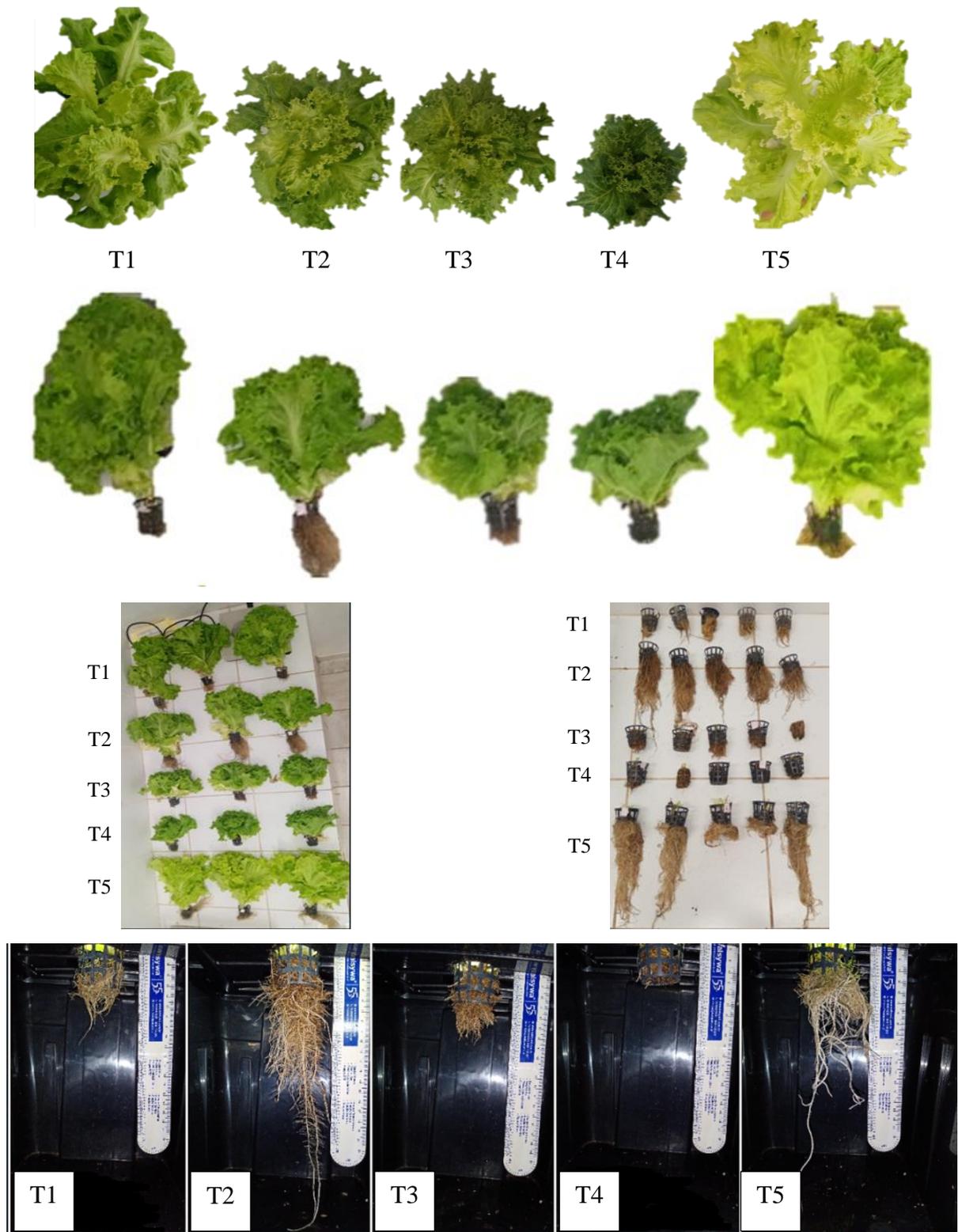


Figura 25. Fotografias de plantas cultivadas em cada um dos tratamentos

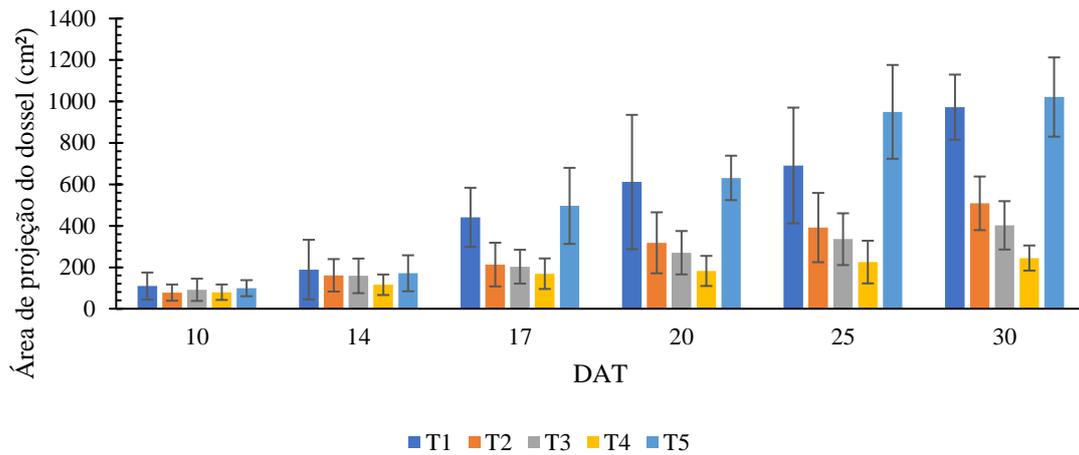


Figura 26. Crescimento de área de projeção do dossel ao longo dos ciclos de cultivo (barras de erros indicam valores de desvio-padrão amostral)

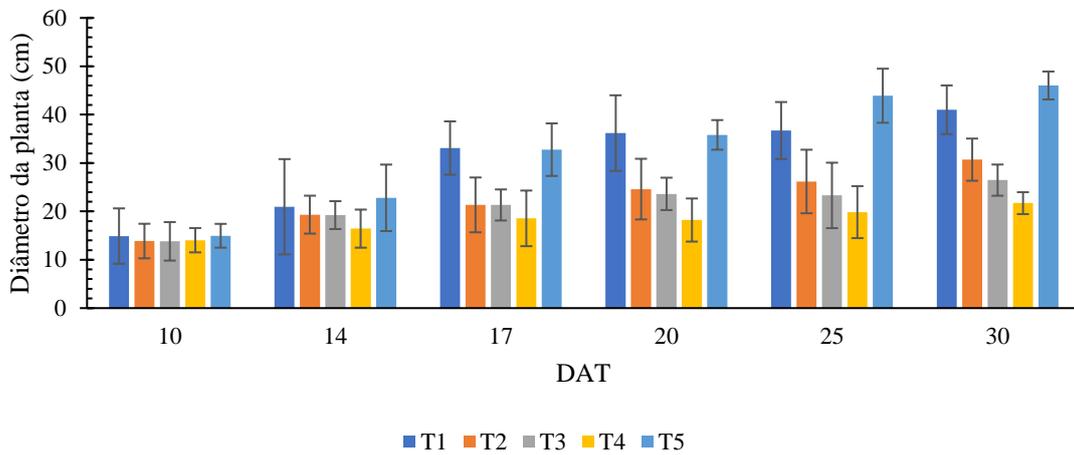


Figura 27. Diâmetro médio das plantas (vista de topo) ao longo dos ciclos de cultivo (barras de erros indicam valores de desvio-padrão amostral)

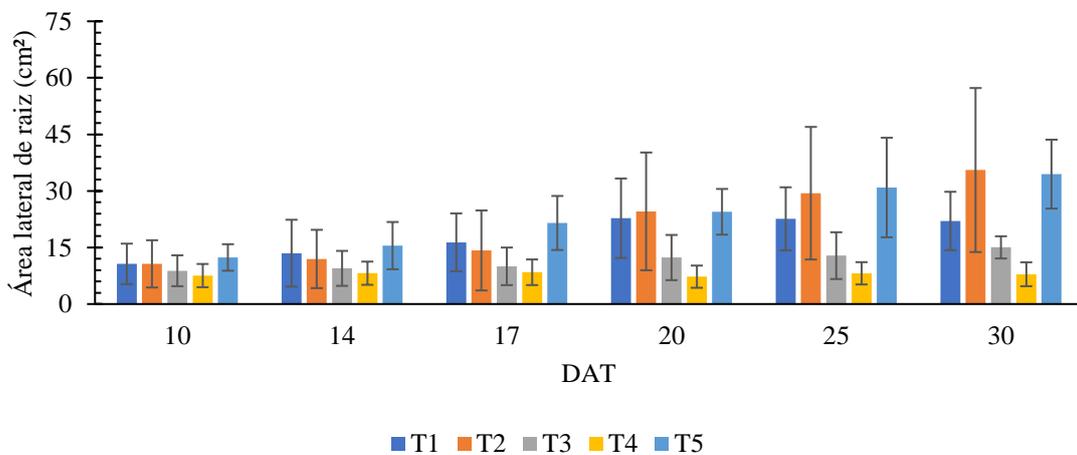


Figura 28. Área de raízes (vista lateral) ao longo dos ciclos de cultivo (barras de erros indicam valores de desvio-padrão amostral)

Tabela 6. Resumo de indicadores de desenvolvimento vegetal e produção nos ciclos de cultivo avaliados

Variável	Tratamento				
	T1	T2	T3	T4	T5
	Média ± Desvio-padrão				
Massa fresca (g/planta)	103,9±42,3 a	65,3±35,1 b	42,6±25,8 bc	28,1±16,1 c	125,1±30,0 a
Nº de folhas por planta	13,9±2,4 ab	12,7±1,7 bc	11,4±1,5 cd	10,1±2,2 d	15,2±2,5 a
Área de projeção do dossel (cm ²)	972,6±156,9 a	508,6±129,4 b	402,2±116,7 b	244,6±60,6 c	1021,2±191,2 a
Diâmetro da planta (cm)	41,0±5,0 a	30,7±4,4 b	26,5±3,2 b	21,7±2,3 c	46,0±2,9 a
Área lateral de raízes (cm ²)	22,0±7,7 bc	35,5±21,8 ab	15,0±2,9 c	7,9±3,2 d	34,5±9,1 a
Clorofila	17,6±1,0 ab	22,1±3,5 a	18,0±4,6 ab	20,9±3,8 ab	15,3±4,1 b
ATT (µg/100 mL)	53,7±39,0 a	40,4±25,7 a	37,6±24,6 a	32,9±25,4 a	45,2±26,9 a
SST (° brix)	3,6±0,5 b	3,6±0,8 b	4,5±1,0 a	4,9±0,7 a	3,0±0,3 c
Flavor	0,41±0,14 cd	0,56±0,20 bc	0,70±0,19 ab	0,96±0,45 a	0,39±0,14 d

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, de acordo com teste estatístico ($p \leq 0.05$)

A massa fresca produzida foi maior nos tratamentos T1 e T5, não havendo diferença entre esses tratamentos. Para os demais tratamentos, verificou-se que o intervalo entre irrigações e o consequente déficit hídrico conduziu a prejuízos para o desenvolvimento das plantas. Mesmo no tratamento T2, em que as irrigações apresentaram alta frequência, observou-se redução de 37,2% em relação ao valor médio de massa fresca do T1. Isso indica que os valores de DPV estabelecidos no início da pesquisa podem não ter sido favoráveis para o cultivo de alface em aeroponia. Lakhier et al. (2019a) e Tunio et al. (2021) observaram que maiores intervalos entre irrigações prejudicaram indicadores de desenvolvimento das plantas e raízes em aeroponia com nebulizadores de injeção de ar.

O número de folhas por planta, área de projeção do dossel (vista de topo) e diâmetro da planta (vista de topo) seguiram o mesmo padrão, sendo que os melhores resultados foram observados em T5 e T1. Isso confirma que os tratamentos T2, T3 e T4 ocasionaram déficit hídrico significativo, resultando em condições desfavoráveis para o desenvolvimento das plantas. Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar valores de DPV acumulado inferiores a 2,0 kPa.h.

Conforme indicado pela área lateral de raízes, o desenvolvimento radicular foi mais vigoroso em T2 e T5. Esse resultado é interessante pois indica que certo nível de déficit hídrico

favorece maior desenvolvimento do sistema radicular, sendo que isso pode ser mais explorado em culturas nas quais se busca produzir mais raízes. Entretanto, observou-se que maior desenvolvimento radicular não conduziu a maior desenvolvimento da parte aérea da planta, sendo que isso é relatado por (LI et al., 2018). Portanto, para a alface, níveis de DPV acumulado inferiores a 2 kPa.h (T2) favorecem melhor desenvolvimento da parte aérea da planta.

(TUNIO et al., 2021) avaliou alfaces do grupo lisa obtendo os seguintes valores médios: número de folhas por planta entre 13 e 28; área de projeção do dossel entre 9,65 e 137,38 cm²; a massa fresca total variou de 9,29 a 63,85 g planta⁻¹. (LAKHIAR et al., 2019) avaliando alfaces crespas em condições de cultivo indoor sob aeroponia relata os seguintes valores médios: número de folhas por planta entre 30 e 35; área de projeção do dossel entre 180 e 200 cm²; a massa fresca total de 140 a 160 g planta⁻¹. A produção de massa fresca observada na presente pesquisa foi similar aquela relatada na literatura citada, porém a área de projeção do dossel foi superior nesta pesquisa provavelmente por diferença de variedades estudadas.

O teor de clorofila de T5 (sistema NFT) foi inferior aos tratamentos aeropônicos. Em condições de cultivo indoor, (LAKHIAR et al., 2019) observou efeitos significativos do tamanho de gotas no teor de clorofila das folhas de alfaces do grupo crespa, relatando maiores teores de clorofila para tamanho de gotas de 46 µm.

A menor concentração de sólidos solúveis (SST) foi observada em T5, sendo que valores mais elevados foram obtidos nos tratamentos sujeitos a maior déficit hídrico (T4 e T3), conforme esperado. Não foi observada diferença significativa na acidez total titulável (ATT) ao comparar os tratamentos.

5 CONCLUSÕES

Níveis de déficit de pressão de vapor acumulado e respectivos efeitos no desenvolvimento da alface cultivada em aeroponia foram avaliados, sendo confirmado que a proposta de critério para tomada de decisões baseada no DPV acumulado é viável para o manejo de sistemas aeropônicos.

De modo geral os melhores resultados de desenvolvimento das plantas foram observados na condição em que o sistema foi operado 24 h dia⁻¹ (T1). Verificou-se que os níveis de DPV acumulado acima de 2,0 kPa.h, avaliados nessa pesquisa, foram relativamente altos para o cultivo de alface em aeroponia, ocasionando déficit hídrico significativo e condições desfavoráveis para o desenvolvimento da parte aérea das plantas. Para trabalhos futuros com alface, recomenda-se avaliar valores de DPV acumulado inferiores a 2,0 kPa.h, que conduzem a irrigações mais frequentes e favorecem o desenvolvimento da parte aérea da planta.

Nas condições de cultivo em aeroponia, observou-se maior desenvolvimento radicular no tratamento T2 (DPV_{acum} = 2,0 kPa.h). Esse resultado é interessante pois indica que certo nível de déficit hídrico favorece maior desenvolvimento do sistema radicular, sendo que isso pode ser mais explorado em culturas nas quais se busca produzir mais raízes. Entretanto, nesta pesquisa, observou-se que maior desenvolvimento radicular não conduziu a maior desenvolvimento da parte aérea da planta.

Os indicadores de tempo de operação empregados para comparação dos tratamentos, evidenciam resultados expressivos em termos de economia de energia ao adotar critérios racionais de manejo de irrigação ao invés de simplesmente manter o sistema acionado 24 h dia⁻¹. Mesmo no tratamento T2, em que as irrigações foram mais frequentes, a redução no tempo de operação do sistema foi de aproximadamente 90% em relação as condições de operação 24 h dia⁻¹. Destaca-se que essas reduções no tempo de operação têm relação direta com os custos operacionais de energia elétrica para pressurização do sistema de irrigação e contribuem para tornar a atividade agrícola mais rentável para os produtores.

Não foram observadas diferenças significativas no desenvolvimento da alface cultivada sob aeroponia (T1) e no sistema NFT (T5), o que favorece a disseminação e adoção de sistemas aeropônicos para o cultivo de folhosas.

Como recomendações para pesquisas futuras, destacam-se os seguintes itens:

- 1) O tamanho de gotas interfere no desenvolvimento da planta, em especial no sistema radicular. Devem ser tomados cuidados na seleção de componentes e nas condições operacionais para assegurar a obtenção de gotas muito finas ($<100 \mu\text{m}$);
- 2) A obtenção de gotas muito finas requer pressões elevadas, sendo que o uso de bombas centrífugas multiestágios contribuem para elevação da temperatura da solução nutritiva. O uso de sistema para refrigeração da solução é necessário, a fim de manter a temperatura inferior a $30 \text{ }^\circ\text{C}$.
- 3) Para o cultivo de alface em aeroponia, recomenda-se avaliar níveis de DPV acumulado de até $2,0 \text{ kPa.h}$.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOYE, E. A. et al. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, n. August 2019, 2020.
- ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. [s.l.] EMBRAPA, 2008.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: [s.n.].
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements - FAO 56**. Rome: FAO, 1998b.
- ALVARENGA, M. A. R. **Tomate: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia**. 2. ed. Lavras: Editora Universitária de Lavras, 2013.
- ALVES, A. et al. Produtividade, acúmulo de nitrato e estado nutricional de cultivares de alface, em hidroponia, em função de fontes de nutrientes. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 195–200, 2002.
- ARGUS. **Understanding and Using VPD**. Canada: [s.n.]. Disponível em: <www.arguscontrols.com>.
- ARMENGAUD, P. et al. EZ-Rhizo: Integrated software for the fast and accurate measurement of root system architecture. **Plant Journal**, v. 57, n. 5, p. 945–956, 2009.
- BAKKER J, C. **Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables ÇGOS-I**. , 1991. Disponível em: <<https://edepot.wur.nl/206443>>. Acesso em: 21 out. 2022
- BALENA, L. et al. Growth, yield and dormancy of aeroponically produced potato minitubers as a function of planting density and harvesting date. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 161–168, abr. 2021.
- BAYONA-PENAGOS, L. V.; VÉLEZ-SÁNCHEZ, J. E.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, P. Efecto del riego deficitario en la poscosecha de pera variedad Triunfo de Viena (*Pyrus communis* L.) en Sesquilé (Cundinamarca, Colombia). **Agronomia Colombiana**, v. 35, n. 2, p. 238–246, 2017.
- BERNARDO, S. et al. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa: UFV, 2019.
- BLAYA-ROS, P. J. et al. Feasibility of low-cost thermal imaging for monitoring water stress in young and mature sweet cherry trees. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 16, 2020.

- BORIANNE, P. et al. GT-RootS: An integrated software for automated root system measurement from high-throughput phenotyping platform images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 150, n. May, p. 328–342, jul. 2018.
- BUCKSETH, T. et al. Methods of pre-basic seed potato production with special reference to aeroponics-A review. **Scientia Horticulturae**, v. 204, p. 79–87, 2016.
- BUCKSETH, T. et al. Influence of Micro-plant Hardening Methods on Aeroponic Potato Mini-tuber Production. **Potato Research**, n. 0123456789, out. 2021.
- BUDIASIH, R. et al. Potato Productivity (*Solanum tuberosum* L.) of G0 Granola L. Varieties at Different Planting Distance and Temperature Grown in Aeroponics. **Journal of Agricultural Sciences – Sri Lanka**, v. 15, n. 2, p. 265, maio 2020.
- ÇALIŞKAN, M. E. et al. Comparison of Aeroponics and Conventional Potato Mini Tuber Production Systems at Different Plant Densities. **Potato Research**, v. 64, n. 1, p. 41–53, 2021.
- CALORI, A. H. et al. Electrical conductivity of the nutrient solution and plant density in aeroponic production of seed potato under tropical conditions (winter/spring). **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 23–32, fev. 2017.
- ÇAYLI, A.; BAYTORUN, A. N. Analysis of climate and vapor pressure deficit (VPD) in a heated multi-span plastic greenhouse. **Journal of Animal and Plant Sciences**, v. 31, n. 6, p. 1632–1644, 1 dez. 2021.
- CLAWSON, J. M. et al. Re-examining aeroponics for spaceflight plant growth. **SAE Technical Papers**, 2000a.
- CLAWSON, J. M. et al. Re-examining aeroponics for spaceflight plant growth. **SAE Technical Papers**, 2000b.
- DE LIMA VASCONCELOS, R. et al. **position and portion of leaf in the of chlorophyll in potato index**. [s.l: s.n.].
- DEJONGE, K. C. et al. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. **Agricultural Water Management**, v. 156, p. 51–62, 2015.
- DELORY, B. M. et al. archiDART: an R package for the automated computation of plant root architectural traits. **Plant and Soil**, v. 398, n. 1–2, p. 351–365, jan. 2016.
- DELORY, B. M. et al. archiDART v3.0: A new data analysis pipeline allowing the topological analysis of plant root systems. **F1000Research**, v. 7, n. January, p. 22, jan. 2018.
- DIN, J. , et al. Physiological and agronomic response of canola varieties to drought stress. **The Journal of Animal & Plant Science**, v. 21, n. 1018–7081, p. 78–82, 2011.

- DOMENE, M.; SEGURA, M. Parámetros de Calidad Interna De Hortalizas Y Frutas En La. **Cajamar ADN Agro**, p. 1–18, 2014.
- ECHER, R. et al. Alfaca à mesa: Implicações sócio-econômicas e ambientais da semente ao prato. **Revista Thema**, v. 13, p. 17–29, 2016.
- FAO. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura -. **Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021**, 2021.
- FURLANI, P. R. et al. **Cultivo Hidropônico de Plantas Parte 2 - Solução nutritiva**. Disponível em: <http://www.infobibos.com/artigos/2009_2/hidroponiap2/index.htm>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- GIMÉNEZ, G.; ANDRIOLO, J.; GODOI, R. Cultivo sem solo do morangueiro. **Ciência Rural**, v. 38, n. 1, p. 273–279, 2008.
- GOPINATH, P.; VETHAMONI, P. I.; GOMATHI, M. Aeroponics Soilless Cultivation System for Vegetable Crops. **Chem Sci Rev Lett**, v. 6, n. 22, p. 838–849, 2017.
- GURLEY, T. W. **Aeroponics: growing vertical**. Boca Raton: CRC Press, 2020a.
- GURLEY, T. W. **Aeroponics: growing vertical**. Boca Raton: CRC Press, 2020b.
- HIKOSAKA, Y. et al. Dry-fog aeroponics affects the root growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Greenspan) by changing the flow rate of spray fertigation. **Environmental Control in Biology**, v. 53, n. 4, p. 181–187, 2015.
- IDRIS, I.; SANI, M. I. Monitoring and control of aeroponic growing system for potato production. **Proceedings of 2012 IEEE Conference on Control, Systems and Industrial Informatics, ICCSII 2012**, p. 120–125, 2012.
- JACTO. **Bicos Jacto**.
- JACTO. **Catálogo Jacto JCI**.
- KIST, B. B. et al. **Anuário Brasileiro de Horti e Fruti 2019** Editora Gazeta Santa Cruz. Santa cruz do sul: [s.n.].
- KOMOSA, A. et al. Yield and nutrient status of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) grown in new and re-used rockwool, polyurethane, nft and aeroponics. **Journal of Elementology**, v. 25, n. 2, p. 523–536, 2020.
- KUNCORO, C. B. D. et al. Aeroponics root chamber temperature conditioning design for smart mini-tuber potato seed cultivation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 9, p. 1–18, 2021.
- LAKHIAR, I. A. et al. Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. **Journal of Sensors**, v. 2018, 2018a.

- LAKHIAR, I. A. et al. Experimental study of ultrasonic atomizer effects on values of EC and pH of nutrient solution. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 5, p. 59–64, 2018b.
- LAKHIAR, I. A. et al. Effects of Various Aeroponic Atomizers (Droplet Sizes) on Growth, Polyphenol Content, and Antioxidant Activity of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Transactions of the ASABE**, v. 62, n. 6, p. 1475–1487, 2019a.
- LAKHIAR, I. A. et al. Effects of Various Aeroponic Atomizers (Droplet Sizes) on Growth, Polyphenol Content, and Antioxidant Activity of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Transactions of the ASABE**, v. 62, n. 6, p. 1475–1487, 2019b.
- LAKHIAR, I. A. et al. Overview of the aeroponic agriculture – An emerging technology for global food security. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1–10, 2020.
- LI, Q. et al. Growth responses and root characteristics of lettuce grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. **Horticulturae**, v. 4, n. 35, 2018a.
- LI, Q. et al. Growth responses and root characteristics of lettuce grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. **Horticulturae**, v. 4, n. 35, 2018b.
- LOPES, C. A.; QUEZADO-DUVAL, A. M.; REIS, A. **Doenças da Alface**. [s.l: s.n.].
- MALDONADE, I.R; MATTOS, L.M; MORETTI, C. L. Manual de boas práticas agrícolas na produção de alface. Em: Brasília: Embrapa hortaliças, 2014. p. 142.
- MARTINEZ, H. E. P. **Manual prático de Hidroponia**. 3. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2017.
- NARISSETTI, N. et al. Semi-automated Root Image Analysis (saRIA). **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 19674, dez. 2019.
- NASA. Innovative Partnerships Program. **Publications and Graphics Department**, v. 1, n. 1, p. 64–67, 2006.
- NOH, H.; LEE, J. The Effect of Vapor Pressure Deficit Regulation on the Growth of Tomato Plants Grown in Different Planting Environments. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 1 abr. 2022.
- ORABY, H.; LACHANCE, A.; DESJARDINS, Y. A Low Nutrient Solution Temperature and the Application of Stress Treatments Increase Potato Mini-tubers Production in an Aeroponic System. **American Journal of Potato Research**, v. 92, n. 3, p. 387–397, jun. 2015.
- PADRÓN, R. A. R. **Manejo, gestão e técnicas em irrigação**. [s.l: s.n.].

- PANTANO, A. P.; CAMPAROTTO, L. B.; MEIRELES, E. J. L. **Monitoramento agrometeorológico para regiões cafeeiras do estado de São Paulo: Janeiro/2010 - Dezembro/2019 (Boletim técnico 224 - IAC)**. Campinas: IAC, 2021.
- PAULO HENZ, G.; SUINAGA, F. **Comunicado Técnico 75Embrapa Hortaliças**. Brasília: [s.n.].
- PICKENS J.; WELLS D.; BLANCHARD C. Greenhouse Lettuce Production. **the Alabama Cooperative Extension System**, p. 8, 2022.
- POTOS, B. INFRAESTRUCTURA. Em: CORPOICA, C. INTERNACIONAL DE LA PAPA (Ed.). **Manual para la producción de semilla de papa Usando aeroponía, diez años de experiencias de Colombia, Ecuador y Peru**. [s.l.] entro Internacional de la Papa Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA, 2015. p. 67–108.
- RAHIMIKHOOB, H.; SOHRABI, T.; DELSHAD, M. Assessment of reference evapotranspiration estimation methods in controlled greenhouse conditions. **Irrigation Science**, v. 38, n. 4, p. 389–400, 13 jul. 2020.
- RASSINI, J. B. Manejo da água de irrigação. Em: **Irrigação e fertilização em fruteiras e hortaliças**. [s.l: s.n.]. p. 156–232.
- RAVEN, P. H.; EVERT, RAY. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2014.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H.; BAR-TAL, A. **Soilless culture: theory and practice**. 2nd. ed. London: Academic Press, 2019a.
- RAVIV, M.; LIETH, J. H.; BAR-TAL, A. **Soilless culture: theory and practice**. 2nd. ed. London: Academic Press, 2019b.
- RITTER, E. et al. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. **Potato Research**, v. 44, n. 2, p. 127–135, jun. 2001.
- ROVER, S.; LUIZ BARCELOS OLIVEIRA, J.; DA PENHA TEIXEIRA NAGAOKA, M. Viabilidade econômica da implantação de sistema de cultivo de alface hidropônica. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 3, p. 169–179, 2016.
- RYKACZEWSKA, K. Field performance of potato minitubers produced in aeroponic culture. **Plant, Soil and Environment**, v. 62, n. No. 11, p. 522–526, nov. 2016.
- SAVAZAKI, E. T. et al. **Hidroponia e cultivo em substrato - Boletim técnico 250**. CampinasCATI, , 2018.

- SEETHEPALLI, A. et al. RhizoVision Explorer: Open-source software for root image analysis and measurement standardization. **AoB PLANTS**, v. 13, n. 6, p. 1–15, 2021.
- SHAHZAD, Z. et al. EZ-Root-VIS: A Software Pipeline for the Rapid Analysis and Visual Reconstruction of Root System Architecture. **Plant Physiology**, v. 177, n. 4, p. 1368–1381, ago. 2018.
- SHT20. **Datasheet SHT20**.
- SONNEVELD, C.; VOOGT, W. **Plant Nutrition of Greenhouse Crops**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009a.
- SONNEVELD, C.; VOOGT, W. **Plant Nutrition of Greenhouse Crops**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009b.
- SPECTRUM TECHNOLOGIES INC. **SPAD 502 Chlorophyll Meter. Spad 502 Data logger Manual** Plainfield, 2009.
- STEWART, B. A.; NIELSEN, B. R. Section V: Soil-Plant-Atmosphere relations. Em: **Irrigation of agricultural crops**. American Society of Agronomy, Madison, Wis.: [s.n.]. p. 343–467.
- SYMONOVA, O.; TOPP, C. N.; EDELSBRUNNER, H. DynamicRoots: A Software Platform for the Reconstruction and Analysis of Growing Plant Roots. **PLOS ONE**, v. 10, n. 6, p. e0127657, jun. 2015.
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. [s.l.: s.n.].
- TESSEMA, L. et al. Determination of Nutrient Solutions for Potato (*Solanum tuberosum* L.) Seed Production under Aeroponics Production System. **Open Agriculture**, v. 2, n. 1, p. 155–159, fev. 2017.
- TORREALBA DE GIL, P. et al. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, v. 20, p. 611–615, dez. 2002.
- TUNIO, M. H. et al. Influence of atomization nozzles and spraying intervals on growth, biomass yield, and nutrient uptake of butter-head lettuce under aeroponics system. **Agronomy**, v. 11, n. 1, 2021a.
- TUNIO, M. H. et al. Influence of Atomization Nozzles and Spraying Intervals on Growth, Biomass Yield, and Nutrient Uptake of Butter-Head Lettuce under Aeroponics System. **Agronomy**, v. 11, n. 1, p. 97, 6 jan. 2021b.
- VAN OS, E. A. Recent advances in soilless culture in Europe. **Acta Horticulturae**, v. 1176, p. 1–8, 2017.

VAN OS, E. A.; GIELING, T. H.; HEINRICH LIETH, J. **Technical equipment in soilless production systems**. [s.l.] Elsevier B.V., 2019.

WEATHERS, P. J.; ZOBEL, R. W. Aeroponics for the culture of organisms, tissues and cells. **Biotechnology Advances**, v. 10, n. 1, p. 93–115, 1992.

WOLLAEGER, H. ;RUNKLE, E. **Why should greenhouse growers pay attention to vapor-pressure deficit and not relative humidity?** Disponível em: <https://www.canr.msu.edu/news/why_should_greenhouse_growers_pay_attention_to_vapor_pressure_deficit_and_n>. Acesso em: 21 out. 2022.

XU, Z. Z.; YU, Z. W.; WANG, D. Nitrogen translocation in wheat plants under soil water deficit. **Plant and Soil**, v. 280, n. 1–2, p. 291–303, fev. 2006.

ZHANG, D. et al. Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer. **Scientific Reports**, v. 7, 7 mar. 2017.