

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Manejo da irrigação por lisimetria de pesagem na produção de mudas de
hortaliças em ambiente protegido

Rafael Gómez Arrieta

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2022

Rafael Gómez Arrieta
Engenheiro Agrônomo

Manejo da irrigação por lisimetria de pesagem na produção de mudas de hortaliças em
ambiente protegido

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:

Profa. Dra. **SIMONE DA COSTA MELLO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Gómez Arrieta, Rafael

Manejo da irrigação na produção de mudas de hortaliças em ambiente protegido – versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

83 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Monitoramento da umidade 2. Evapotranspiração 3. Deficit hídrico 4. Cultivo em recipientes 5. Sistema hidropônico 6. *Lactuca sativa* 7. *Solanum lycopersicum* I. Título

DEDICATÓRIA

A Deus todo poderoso pela força, guia e direção em todo momento.

A toda minha família especialmente meu pai ALVARO GÓMEZ MENDOZA, pelo imenso apoio emocional e intelectual desde a distância e também, minha esposa Mónica e filha Clara, que sempre me acompanharam durante esta etapa da minha vida.

Com Amor,

Rafael.

AGRADECIMENTOS

À minha amada família pelo apoio, colaboração e amor em todos os momentos do Doutorado, especialmente minha irmã Jenny que me orientou para a realização da Pós-Graduação e sempre realizou aportes morais e científicos na minha carreira acadêmica.

À minha esposa Mônica, que sempre esteve no meu lado e me apoiou em cada instante.

À minha orientadora Profa. Dra. Simone pelo grande apoio, compreensão, respeito, colaboração, orientações e conhecimentos compartilhados durante todo o processo de estudo.

A todos os membros do grupo de estudo e práticas em olericultura – GEPOL da Graduação e Pós-Graduação, especialmente Gustavo Quesada, Roberta Nogueirol, Rachel Tohanati, Alessandro Sabino, Antônio Pereira, Isabela de Freitas, Walleska Torsian, Fernando Silveira, Vivyan Conceição, Paulo Momesso, Pâmela Alzeman, Caique Menezes, Paulo de Wit, Thiago Negrini, Bruna Godinho, Pedro Leme, Guilherme Barcellos, pela disposição, amizade, aprendizado.

À Jaime Navarrete, grande amigo e pessoa que dispôs de tempo, energia, dedicação e disposição para me orientar na programação, eletrônica e construção do projeto e sua esposa Taís, pela alegria e amizade.

Aos meus amigos Carlos, Rolando, Wilfrand, Bruna, Elena, Abdul, David, Fábio, Alex, Angelica, Andrés Rico Andrés trujillo, Rodolfo, Soledad, e demais pessoas que me auxiliaram, por todo seu apoio moral e acadêmico.

A todos os membros do grupo orquestra ESALQ, especialmente Cintia e Martha, pelo apoio na arte da música e pelos momentos especiais.

À Dra. Clíssia Barbosa pelo empréstimo dos equipamentos SeedReporter e VideoMeterLab, e pelo auxílio nas análises de imagens.

Aos técnicos Dr. Marcos, Edson e Aurio pelo auxílio nas análises, e ao pessoal do Laboratório de Pós-Colheita de Plantas Hortícolas, do Laboratório Multiusuários do LPV e do laboratório de eletrônica do LEB.

Aos professores Aquiles Darghan Contreras, Sergio N. Duarte, Paulo Mazzafera, Quirijn de Jong van Lier, Rubens Coelho e Paulo Sentelhas†, pelas orientações recebidas.

Ao colega Luiz Vieira, pelo apoio acadêmico e científico na escrita da Tese.

À Empresa IBS mudas, pela disposição e recursos para o desenvolvimento do projeto.

À Governação do departamento de Norte de Santander – Colombia, meus mais sinceros agradecimentos pela oportunidade e bolsa de estudos concedida.

À ESALQ/USP por tudo, muito obrigado!

EPÍGRAFE

*“Ningún hombre por más esfuerzos
que haga con su corazón o con su mente,
puede entender o comprender la naturaleza
y el poder de Dios. El único camino para
lograr el contacto con el Poder de Dios es estar
quieto internamente, con paciencia, confianza
y sincera sumisión del ser”*

Muhamah Subuh Sumohadiwidjojo

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	13
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
2.1 Localização e características da área experimental.....	19
2.2 Produção de mudas e sistema de irrigação.....	19
2.3 Delineamento experimental e tratamentos.....	21
2.4 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET ₀) e do Coeficiente da cultura (K _c).....	24
2.5 Variáveis analisadas durante o experimento.....	25
2.6 Variáveis no momento do transplante.....	25
2.6.1 Crescimento das mudas.....	25
2.6.2 Desenvolvimento do sistema radicular.....	25
2.6.3 Medidas de fotossíntese.....	25
2.6.4 Análise de imagens multiespectrais.....	26
2.6.5 Teor de clorofila e carotenoides.....	26
2.6.6 Teores de macronutrientes nas folhas.....	26
2.7 Eficiência do uso de água.....	27
2.8 Análises estatísticas.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
3.1 Dados meteorológicos, perfis da irrigação, estimativa da (ET ₀) e do (K _c).....	29
3.2 Produção de mudas de alface.....	37
3.2.1 Variáveis de crescimento analisadas durante o experimento.....	37
3.2.2 Variáveis analisadas no momento do transplante.....	40
3.2.2.1 Crescimento das mudas.....	40
3.2.2.2 Desenvolvimento do sistema radicular.....	44
3.2.2.3 Medidas da fotossíntese.....	45
3.2.2.4 Análise de imagens multiespectrais.....	47
3.2.2.5 Teor de clorofila e carotenoides.....	47
3.2.2.6 Teores de macronutrientes nas folhas.....	52
3.2.3 Eficiência do uso de água.....	52
3.3 Produção de mudas de tomate.....	53
3.3.1 Variáveis de crescimento analisadas durante o experimento.....	53
3.3.2 Variáveis analisadas no momento do transplante.....	57
3.3.2.1 Crescimento das mudas.....	57
3.3.2.2 Desenvolvimento do sistema radicular.....	60
3.3.2.3 Medidas da fotossíntese.....	60
3.3.2.4 Análise de imagens multiespectrais.....	63
3.3.2.5 Teor de clorofila e carotenoides.....	64
3.3.2.6 Teores de macronutrientes nas folhas.....	68
3.3.3 Eficiência do uso de água.....	69

4. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS.....	73
APÊNDICE.....	79

RESUMO

Manejo da irrigação por lisimetria de pesagem na produção de mudas de hortaliças em ambiente protegido

O adequado manejo da água nos sistemas de produção de mudas é essencial para a produtividade e qualidade final das culturas. O déficit ou excesso de água são prejudiciais para o crescimento vegetal. A falta de água vai acarretar em estresse hídrico e o excesso reduz o oxigênio disponível no sistema radicular; assim é alterado negativamente o funcionamento fisiológico e, portanto, o crescimento. Devido ao fato que no sistema de produção de mudas em recipientes, é difícil a implementação de sensores dentro do substrato para controlar o teor de umidade, o uso de minilísimetros de pesagem é uma alternativa apropriada para o manejo da irrigação. Como existe pouca informação sob a relação entre o consumo de água, os níveis de umidade mais adequados dos substratos e a qualidade das mudas produzidas em viveiro, este trabalho se propôs a avaliar a qualidade de mudas de hortaliças em função de níveis de umidade no substrato, monitorados por lisimetria pesagem em ambiente protegido. Foram calculados valores de ET_c entre 2,6 e 3,3 mm dia^{-1} e uma $ET_o\text{-PM}$ com valores médios entre 4 e 5 mm dia^{-1} . Para a plântulas de alface, se determinaram valores de K_c de 0,63 e para tomate de 0,65, nesta fase de crescimento. Foi evidenciado estresse hídrico, principalmente quando a umidade no substrato foi mantida em torno de 40 %, o que provocou diminuições significativas nos parâmetros avaliados, especialmente redução no crescimento e menor desempenho do sistema radicular, assim como limitações na atividade fisiológica e características próprias geradas pelos efeitos deste tipo estresse nas plântulas, como menor área foliar e altura, maior teor de clorofila B, incremento do diâmetro médio da raiz e altos valores do índice intrínseco do uso da água. As mudas submetidas a faixas de 60 e 70 % de umidade, apresentaram consumo hídrico moderado e foram semelhantes em termos qualidade em relação ao controle. Por tanto, manter esses níveis de umidade poderia ser indicado para reduzir o gasto hídrico e produzir mudas de maior qualidade.

Palavras-chave: Monitoramento da umidade, Evapotranspiração, Deficit hídrico, Cultivo em recipientes, Sistema hidropônico, *Lactuca sativa*, *Solanum lycopersicum*.

ABSTRACT

Irrigation management by weighing lysimeter in the production of vegetable seedlings in a protected environment

Proper water management in seedling production systems is essential for productivity and final crop quality. Water deficit or excess is detrimental to plant growth. A lack of water will lead to water stress and an excess reduces the oxygen available to the root system, thus negatively altering the physiological functioning and thus growth. Because in the containerized production system, it is difficult to implement sensors inside the substrate to control the moisture content, the use of mini weighing lysimeters is a suitable alternative for irrigation management. As there is little information about the relationship between water consumption, the most adequate substrate moisture levels and the quality of seedlings produced in nurseries, this work aimed to evaluate the quality of vegetable seedlings as a function of substrate moisture levels, monitored by weighing lysimetry in a protected environment. ET_c values between 2.6 and 3.3 mm day⁻¹ and an ET_o -PM with average values between 4 and 5 mm day⁻¹ were calculated. For the lettuce seedlings, K_c values of 0.63 and for tomato seedlings 0.65 were determined at this stage. Water stress was evidenced, especially when the substrate humidity was kept around 40%, which caused significant decreases in the parameters evaluated, especially reduced growth and lower performance of the root system, as well as limitations in physiological activity and characteristics generated by the effects of water stress on the seedlings, such as smaller leaf area and height, higher chlorophyll B content, increased mean root diameter, and high intrinsic water use index values. Seedlings submitted to 60 and 70 % humidity levels showed moderate water consumption and were similar in quality to the control. Therefore, maintaining these humidity levels could be indicated to reduce water consumption and produce high quality seedlings.

Keywords: Moisture management, Evapotranspiration, Water deficit, Growing in containers, Hydroponic system, *Lactuca sativa*, *Solanum lycopersicum*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da empresa IBS mudas e coordenadas do local dos experimentos.	19
Figura 2 - Semeadura de mudas mecanizada em recipientes tipos bandejas de polietileno (a, b, c, d), disposição na câmara de germinação (e) e sistema de irrigação (f)	20
Figura 3 - Esquema dos componentes eletrônicos acoplados no Arduino nano, cérebro do sistema eletrônico de monitoramento de umidade.....	22
Figura 4 - Lisímetros de pesagem instalados na bancada experimental (a) e esquema da distribuição dos tratamentos (b)	23
Figura 5 - Temperatura (a), umidade relativa (b) e radiação solar líquida (c) externas e internas durante o primeiro ciclo de cultivo.....	29
Figura 6 - Perfis de irrigação construídos a partir de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o primeiro cultivo de alface.....	30
Figura 7 - Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência (ETo - PM) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o primeiro cultivo de alface.....	30
Figura 8 - Perfis de irrigação construídos a partir de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o primeiro cultivo de tomate.....	31
Figura 9 - Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência (ETo - PM) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o primeiro cultivo de tomate	32
Figura 10 - Temperatura (a), umidade relativa (b) e radiação solar líquida (c) externas e internas durante o segundo ciclo de cultivo.....	32
Figura 11 - Perfis de irrigação construídos de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o segundo cultivo de alface	33
Figura 12 - Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência (ETo - PM) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o segundo cultivo de alface.....	34

Figura 13 - Perfis de irrigação construídos de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o segundo cultivo de tomate	35
Figura 14 - Evapotranspiração da cultura (ETc) evapotranspiração de referência (ETo) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o segundo cultivo de tomate.....	35
Figura 15 - Massa fresca (a, c, e) e seca (b, d, f) da parte aérea, da raiz e índice de área foliar (g) no primeiro cultivo de alface.....	38
Figura 16 - Massa fresca (a, c, e) e seca (b, d, f) da parte aérea, da raiz e índice de área foliar (g) no segundo cultivo de alface.....	40
Figura 17 - Modelos quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*), de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de alface prontas para o transplante no primeiro cultivo.....	42
Figura 18 - Modelos quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*), de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de alface prontas para o transplante no segundo cultivo	43
Figura 19 - Plantas de alface aos 35 dias após semeio, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em capacidade de teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).....	44
Figura 20 - Modelos lineares significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*) de parâmetros fisiológicos em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de alface prontas para o transplante	46
Figura 21 - Distribuição das variáveis nos componentes principais no primeiro (a) e segundo (c) cultivo de alface	49
Figura 22 - Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no primeiro cultivo de alface.....	50
Figura 23 - Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no segundo cultivo de alface.....	51
Figura 24 - Eficiência do uso da água no primeiro e segundo cultivo de alface.....	52
Figura 25 - Massa fresca (a, c, e, g) e seca (b, d, f, h) da parte aérea e da raiz, e área foliar (i) no primeiro cultivo de tomate	54

Figura 26 - Massa fresca (a, c, e, g) e seca (b, d, f, h) da parte aérea e da raiz, e área foliar (i) no segundo cultivo de tomate	56
Figura 27 - Plântulas de tomate aos 42 dias após semeio, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).....	58
Figura 28 - Modelos lineares e quadráticos significativos pelo teste de F a 5% de probabilidade (*), de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes ao incremento do TU (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no primeiro cultivo	59
Figura 29 - Modelos lineares e quadráticos significativos pelo teste de F a 5% de probabilidade (*), de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes ao incremento do TU (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no segundo cultivo... ..	60
Figura 30 - Modelos lineares e quadráticos de parâmetros fisiológicos em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes ao incremento do TU (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no primeiro cultivo	62
Figura 31 - Modelos lineares e quadráticos de parâmetros fisiológicos em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes ao incremento do TU (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no segundo cultivo	63
Figura 32 - Distribuição das variáveis nos componentes principais no primeiro (a) e segundo (b) cultivo de tomate	66
Figura 33 - Matriz de correlação (B) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (C) e massa seca da raiz (D) no segundo cultivo de tomate	67
Figura 34 - Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no segundo cultivo de tomate	68
Figura 35 - Eficiência do uso da água no primeiro e segundo cultivo de tomate	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos para mudas de alface.....	23
Tabela 2 - Descrição dos tratamentos para mudas de tomate	24
Tabela 3 - Massa fresca, massa seca (mg planta^{-1}), área foliar (cm^2) e altura (cm) por plântula de alface no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em porcentagem do teor de umidade – TU e comparados com o manejo do produtor (controle)..	41
Tabela 4 - Longitude (cm), área projetada (cm^2), área superficial (cm^2), diâmetro médio (mm), volume (cm^3), número de pontas, altitude de mudas de alface no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle)	44
Tabela 5 - A: Taxa de fotossínteses neta, e: Transpiração, gs: Condutância estomática, ici: Concentração intracelular de CO_2 e iWUE: Índice intrínseco de eficiência de uso da água em mudas de alface no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle)	45
Tabela 6 - f0: Fluorescência mínima, fm: Fluorescência máxima, fv/fm: Eficiência quantifica máxima do fotossistema ii, red: Refletância no vermelho, green: Refletância no verde, Blue: Refletância no azul, Chldx: Índice de clorofila a, Ariidx: Índice de antocianinas, Chl710: Fluorescência de clorofilas a 710 nm de mudas de alface no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).....	47
Tabela 7 - Teores de clorofila a clorofila b, clorofila total e carotenoides (mg g^{-1}) de mudas de alface no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle)	48
Tabela 8 - Correlação entre os componentes principais e as variáveis estudadas no cultivo de alface. ...	48
Tabela 9 - Biomassa fresca, seca (mg planta^{-1}) de mudas de tomate no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle)	57

- Tabela 10 - Longitude (cm), área projetada (cm²), área superficial (cm²), diâmetro médio (mm), volume (cm³), número de pontas e altitude de mudas de tomate no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle) 60
- Tabela 11 - A: Taxa de fotossínteses neta, e: Transpiração, gs: Condutância estomática, ici: Concentração Intracelular de CO₂ e iWUE: índice intrínseco de eficiência de uso da água em mudas de tomate no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle) 61
- Tabela 12 - f0: Fluorescência mínima, fm: Fluorescência máxima, fv/fm: Eficiência quantifica máxima do Fotossistema ii, red: Refletância no vermelho, Green: Refletância no verde, Blue: Refletância no azul, Chlidx: Índice de clorofila a, ariidx: Índice de antocianinas, chl710: Fluorescência de clorofilas a 710 nm de mudas de tomate no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle). 64
- Tabela 13 - Teores de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides (mg g⁻¹) de mudas de tomate no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle) 65
- Tabela 14 - Correlação entre os componentes principais e as variáveis estudadas no cultivo de tomate.. 65

1. INTRODUÇÃO

A produção de mudas de alta qualidade é fundamental para assegurar a produtividade. Depois de conhecer a procedência da semente, a rentabilidade hortícola é condicionada pelas condições meteorológicas, as quais contribuem para presença de fatores como pragas, doenças, défices de nutrientes, e principalmente estres abiótico pela disponibilidade de água no meio de crescimento (substrato, solo). As hortaliças são sensíveis às variações meteorológicas, entre as quais se incluem oscilações de temperatura, umidade relativa do ar, ventos fortes e altos valores de radiação solar, os quais podem ocasionar efeitos negativos no crescimento das mudas, o que acontece devido à fragilidade das hortaliças nesta etapa fenológica. Essas condições tem obrigado os produtores a modificar o sistema para o ambiente protegido, que propicia melhores condições de crescimento vegetal com relação ao ambiente natural (Santos et al., 2015). O ambiente protegido, além de reduzir as variações meteorológicas, permite a antecipação da colheita, reduz a evapotranspiração, incrementa a eficiência no uso da água pelas plantas e facilita a produção em qualquer época do ano (Silva et al., 1998; Radin et al., 2004; Santana et al., 2009).

Outro importante componente da produção é o substrato, insumo básico que substitui o solo no cultivo em recipientes. O cultivo em recipientes com substratos, quando se trata da formação das mudas, tem proporcionado aumentos substanciais na sua qualidade. Seus atributos físicos, químicos e biológicos devem oferecer as melhores condições para uma excelente germinação e desenvolvimento. As principais propriedades químicas que caracterizam o substrato são, pH, capacidade de troca catiônica, salinidade e teor de matéria orgânica e as físicas constituem, a densidade, a porosidade, e o espaço de aeração, as quais influenciam diretamente na água disponível para as plantas em diferentes potenciais e teores de umidade massa/massa (m/m) (Trani et al., 2007).

Diversos materiais provenientes de resíduos da agroindústria, são continuamente avaliados para serem usados como substratos, de maneira que forneçam as quantidades suficientes de água e oxigênio para um ótimo desenvolvimento vegetal (Kampf, 2002; Zorzeto et al., 2014). A turfa é o substrato mais empregado no mundo, embora a fibra de coco tem incrementado sua aceitação no mercado brasileiro, por ser um produto nacional, a turfa ainda é o substrato mais empregado pelos produtores de mudas de hortaliças no Brasil (Nunes, 2000).

Sendo assim, as características dos substratos e também dos recipientes, determinam as condições de manejo e qualidade final das mudas. O espaço de aeração é uma característica que corresponde ao mínimo porcentual de ar encontrado após a irrigação e livre drenagem. Na medida em que o substrato for secando, este espaço vai se ocupando pelo ar (macroporos), enquanto vai diminuindo o espaço é ocupado pela água, fazendo-a facilmente disponível (mesoporos). Desse modo, o ponto de início da próxima irrigação é atingido perto do volume de água tamponante (microporos). Essa água pode ser usada pelas plantas, mas, exige um grande gasto energético para sua absorção (Fermino, 2002). Recipientes de maior altura têm maior fluxo de água por gravidade, pois a base maior atua como uma barreira onde a água encontra-se na pressão atmosférica ou potencial zero. Em consequência, a altura reduzida das células (4 cm) dificulta a drenagem, e incrementa a capacidade de retenção da água, o que pode levar ao encharcamento do substrato mais facilmente. Portanto é recomendado conhecer com precisão o limite de saturação para evitar as perdas de água por drenagem e baixa oxigenação por saturação do sistema radicular (Oviedo e Minami, 2012).

É importante apontar que, o conteúdo relativo de água em uma célula “*plug*” é maior do que o contido num vaso, pois após saturação e livre drenagem, a altura da camada previamente saturada é a mesma que a altura do recipiente, o que também explica que a capacidade do recipiente na célula (Nascimento et al., 2012), sempre será maior que a capacidade de campo para um mesmo material (Handreck e Black, 1999).

Por conseguinte, o menor volume das células e o uso de determinado substrato, exigem maior precisão no manejo da água e da fertilização. O adequado fornecimento de água, e a disponibilidade de macro e micronutrientes, e oxigênio para as raízes durante todo o período de crescimento, permitem o balanço necessário para produzir uma muda de alta qualidade e evitar os efeitos indesejáveis do déficit hídrico. A reduzida profundidade dos recipientes e a alta retenção de água dos substratos, geram alta evaporação e transpiração. portanto devem ser usados menores volumes de água e maiores frequências de irrigação com relação ao cultivo no solo (Borowski e Nurzyński, 2012).

Quando se trata do efeito sob as plantas, o déficit ou excesso de água influencia negativamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal, desde o plantio ou transplante de mudas até a colheita (Kampf, 2002). Devido à sensibilidade das mudas, a irrigação deve ser baseada no fornecimento de água na quantidade precisa e no momento oportuno (Marouelli e Silva, 2012). Porém, a maioria de produtores irrigam empiricamente, pois raras vezes monitoram a umidade nos substratos, o que provoca a aparição de doenças, redução da aeração do meio e salinização. É necessário incrementar a eficiência do uso da água, pois a crescente escassez e o desperdício dela tem impactos negativos no ambiente e na qualidade das mudas. Assim, os proceso deve ser focado a um equilíbrio preciso entre a produtividade agrícola e a sustentabilidade (Bezerra et al., 2019).

Quanto ao tipo de irrigação, mesmo que existam muitos sistemas na olericultura, na produção de mudas a irrigação por micro aspersão é uma das técnicas mais empregadas pela praticidade, uniformidade e rapidez no processo. A maior diferença em relação á irrigação por gotejamento é que essa é superficial é acaba sendo uma técnica de difícil uso em este sistema, pois no geral são utilizadas bandejas compartimentalizadas com mini recipientes para cada plântula.

Cabe ressaltar, que para manter a umidade do substrato no nível que garanta o equilíbrio entre a disponibilidade de água e o ar para as raízes, o sistema exige maior frequência e menos volume de irrigação (Allaire et al., 2004). Essas particularidades implicam em risco de estresse, a causa de eventos temporais de déficit hídrico no meio, que devem ser prevenidos com um rigoroso controle da irrigação, no qual é fundamental o monitoramento da umidade (Gervásio e Ferreira, 2014). Assim, é necessário a implantação de estratégias que tornem a irrigação mais eficiente. Embora os produtores procurem manter o nível de umidade no substrato em valores próximos à capacidade do recipiente sem ultrapassar este limite para evitar drenagem, esse nível pode descer a valores críticos e provocar déficit hídrico principalmente pela influência das condições ambientais, o que gerará fortes variações de umidade durante o dia e futuros problemas no desenvolvimento da planta, principalmente pela falta de sistemas de monitoramento da umidade nos substratos (Rincón e Sáez, 1997).

Uma alternativa para contabilizar as entradas e saídas da água em um sistema de cultivo em recipientes, é o uso de lisímetros eletrônicos de pesagem (Silva et al., 1999; Campeche, 2002; Carvalho et al., 2007). Silva et al., (1999) esclarece que esse tipo de lisímetro utiliza a medida automatizada de células de carga instaladas a baixo uma estrutura (caixa impermeável) ou suporte, medindo a variação de peso, assim quando se tem consumo de água pelas plantas ou evaporação, no lisímetro ocorre uma diminuição do peso do volume de controle, que é proporcional à evapotranspiração. Embora, inicialmente os lisímetros terem sido desenvolvidos para quantificação da água percolada do solo, hoje, em estudos de hidrologia, a lisimetria é uma técnica muito usada para a determinação do balanço hídrico de um sistema em condições de pesquisa; além disso, pode ser empregada em cultivo protegido (Fernandes et al.,

2012). Antigamente o uso de lisímetros era mais restrito ao objetivo para o qual foi desenvolvido, mas, atualmente com os avanços da eletrônica, tem sido facilitado seu uso e fabricação em função da disponibilização de sensores mais precisos e econômicos no mercado, o que inclui células de carga de diferentes capacidades (Fernandes et al., 2012).

Para garantir o adequado funcionamento dos lisímetros de pesagem, previamente devem ser estabelecidos os limites de máxima capacidade da retenção da água no recipiente (capacidade de recipiente ou de container) e o peso crítico (início da irrigação) com a maior exatidão possível, pois a finalidade é manter as plântulas nas melhores condições de umidade e aeração do substrato (Gervásio e Ferreira, 2014). Quaglia (2005) sugere que as células de carga devem ser bem localizadas, niveladas e protegidas cuidadosamente, por causa de instabilidade dos sinais elétricos que podem influir nas leituras de peso durante o dia, devido às variações de umidade e temperatura perto da superfície do solo.

Pesquisas desenvolvidas por Alves et al., (2004)¹ mostraram erros das medias da evapotranspiração da cultura ao longo do dia, os quais foram mais perceptíveis durante a noite pela influência da velocidade do vento, embora dentro da estufa a velocidade do vento fosse baixa ($< 5 \text{ m s}^{-1}$), foram perturbadas as medidas de peso dadas pelo lisímetro de pesagem da célula de carga eletrônica, o que indica que a toma de dados deve ser em intervalos de tempo mais extensos (10 a 60 minutos). Ao avaliar o desempenho de um lisímetro móvel de pesagem que utilizava uma célula de carga hidráulica, Santos (2004) indicou que o equipamento evidenciou uma alta exatidão na determinação da variação da umidade, em mudas cítricas. Além disso, sugere que as pesagens sejam efetuadas na mesma hora do dia, quando as variações de temperatura sejam mínimas, para reduzir a influência dessa variável sob os componentes do lisímetro. A calibração dos lisímetros é uma das etapas mais importantes que devem ser realizadas durante a implementação do equipamento; a calibração inadequada do lisímetro leva a dados inconsistentes dos valores de evapotranspiração. Assim, em condições de campo, a calibração do lisímetro de pesagem, pode ser realizada com a adição ou a subtração de massas-padrões (Carvalho et al., 2007; Fernandes et al., 2012).

Por outro lado, o consumo ou perda da água, é resultante dos processos simultâneos de evaporação e transpiração das plantas, fenômeno conhecido como “evapotranspiração - ET”. No geral, os sistemas de produção de mudas de hortaliças carecem de estratégias que permitam medir a umidade no meio de crescimento (Fernandes et al., 2012). Com o monitoramento da umidade com a lisimetria de pesagem, pode se determinar “*in situ*” a evapotranspiração da cultura (ET_c), ao fazer a contabilização das entradas (irrigação) ou saídas de água em um dado volume de substrato e um espaço de tempo específico (Sentelhas, 1998; Gervásio e Ferreira, 2014). A medição *in situ* da umidade do meio facilita as rápidas decisões para um adequado manejo da irrigação, o que permite conhecer com exatidão quanto e quando irrigar (Silva, 2012). A ET é influenciada por fatores próprios da espécie plantada, meio de crescimento e principalmente pelas condições meteorológicas (Sentelhas, 1998; Fernandes et al., 2012). A evapotranspiração de referência - ET_o, pode ser estimada de diversas formas, mas, o modelo mais utilizado é a referência da FAO e a equação parametrizada por Alem et al., (1998) de Penman-Monteith (PM). No trabalho de Carvalho et al. (2007) foi possível validar o funcionamento do lisímetro de pesagem, tomando as medidas de evapotranspiração em concordância com as estimativas realizadas pelo método ET_o - PM, em uma área plantada com grama-batatais.

Entretanto, a ET dentro das estufas é frequentemente menor do que no exterior, devido à atenuação do fluxo de radiação solar e reduzida velocidade do vento no ambiente fechado. Dessa maneira, a temperatura e umidade relativa, durante o dia, podem alcançar maiores valores no interior. Consequentemente, a ET no interior pode ser torno de 60 a 80% da verificada no exterior das estufas; no entanto, isto depende do nível tecnológico da estufa (Vásquez et al., 2005). Para manter uma temperatura adequada no interior da estufa, é fundamental o acúmulo de energia durante o dia e sua manutenção durante a noite; por isso são utilizadas telhas termorrefletoras. As diferenças severas de radiação

e temperatura ao longo do dia podem resultar em um desenvolvimento irregular das plântulas no interior da estufa (Romanini et al., 2010). Portanto, é recomendado abrir as laterais ou utilizar sistemas de resfriamento para evitar que a temperatura interna supere o limite fisiológico da cultura, já que durante o dia a temperatura interna excede entre 10 e 25% a externa (Rebouças et al., 2015).

Contudo, é importante dizer que alface e tomate são hortaliças maioritariamente recipientizadas, devido á baixa emergencia quando semeadas diretamente no solo, também pelo alto custo de sementes, mas principalmente pela obtenção de mudas de alta qualidade graças a este sistema. Mudanças de alface de qualidade devem apresentar parte aérea compacta, com caule curto, folhas mais largas e menos longas (não estioladas) e um sistema radicular bem desenvolvido. A qualidade da muda dessa espécie encontra-se associada com a precocidade e produção de biomassa (Oviedo e Minami, 2012). No caso do tomateiro, são caracterizadas por ter um padrão na parte aérea compacta com o diâmetro do caule maior do que 3 mm e um sistema radicular bem ramificado, que ocupe todo o volume do substrato no recipiente, além de cotilédones e folhas verdes bem desenvolvidos. De acordo ao descrito por Alves et al., (2004), Magro et al., (2011) e Schwertner et al., (2013), uma muda do tomateiro de boa qualidade condiciona a precocidade da produção e a produtividade, além do pegamento dos frutos e seu tamanho.

Em conformidade ao anterior, o controle ambiental e o controle da umidade nos substratos (manejo adequado da irrigação) são estratégias primordiais na produção de mudas de qualidade. Desse modo, o déficit hídrico ou o excesso de água prejudica a qualidade da muda e também condiciona a produtividade final (Castellanos, 2009). Embora na literatura se encontrem inúmeros trabalhos sobre o manejo da irrigação na fase de produção (Albuquerque et al., 2012; Nogueira et al., 2012; Gervásio et al., 2014; Santos et., 2015; Girardi et al., 2016), ainda existe pouca informação ao respeito na fase de viveiro, especificamente sob a relação entre o consumo de água, os níveis de umidade mais adequados dos substratos e a qualidade das mudas de hortaliças. A execução deste trabalho se propôs avaliar a qualidade de mudas de hortaliças em função de níveis de umidade no substrato, monitorados por lisimetria pesagem em ambiente protegido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e características da área experimental

Foram conduzidos quatro experimentos de setembro a novembro de 2019, e de outubro a dezembro de 2020, na empresa IBS mudas, localizada no km 20 da rodovia Piracicaba/Rio Claro, sítio Santana, Vila Nova, município de Piracicaba, SP, nas coordenadas geográficas: 22° 36' 36,6" de latitude Sul; 47° 35' 36,6" de longitude Oeste a 575 m de altitude. O clima da região é classificado como Cwa: tropical úmido, com três meses secos, chuvas de verão e seca no inverno, segundo a classificação de Köpen. A estrutura da estufa era de aço galvanizado com telhado em arco e altura de 4,5 m (do nível do solo até o início do telhado) e dimensões de 8 m de largura e 100 m de comprimento, coberta com filme plástico de 150 µm, antiestático com proteção UV, transmissão de radiação fotosinteticamente ativa de 88% e difusão de 58%. Na base do telhado foi instalada uma malha termorrefletora 50%; a estufa foi climatizada por sistema de resfriamento evaporativo, para o controle da temperatura e da umidade relativa do ar no interior, programado para manter o ambiente abaixo de 28°C e entre 60 e 85% de umidade relativa.



Figura 1. Localização da empresa IBS mudas e coordenadas do local dos experimentos (Google Maps, 2019).

2.2. Produção de mudas e sistema de irrigação

A semeadura foi realizada em bandejas de polietileno de 200 células para a alface crespa (*Lactuca sativa* L.) cv. Vanda, com volume de 10 cm³ por célula e de 128 células para o tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Santa Cruz Kada, com volume de 18 cm³ por célula, com dimensões de 27 x 54 cm. As bandejas foram preenchidas com turfa (Figura 2a) à base de sphagnum (Pindstrup®) composta por 85% de turfa + 15% de fibra de madeira, com capacidade

de retenção de água (CRA) de 40%, EC = 0,3 ds m⁻¹ sem fertilizantes e pH = 5,6. Após a semeadura (Figura 2b), as sementes foram cobertas com uma fina camada de vermiculita (Figura 2c), molhadas até 50% de umidade m/m (Figura 2d). Em seguida as bandejas foram protegidas por uma capa de polietileno preto (Figura 2e), e levadas para uma câmara escura a $80 \pm 2\%$ de umidade relativa e $22 \pm 2^\circ\text{C}$ para a germinação das sementes, que ocorreu durante um período 24h (alface) e 48h (tomate).

A irrigação foi realizada por aspersão, usando um sistema de deslocamento linear (barra móvel), que permitiu o fornecimento de água na área útil com alta uniformidade, sem a necessidade de irrigar os corredores ou áreas perdidas (Figura 2f).

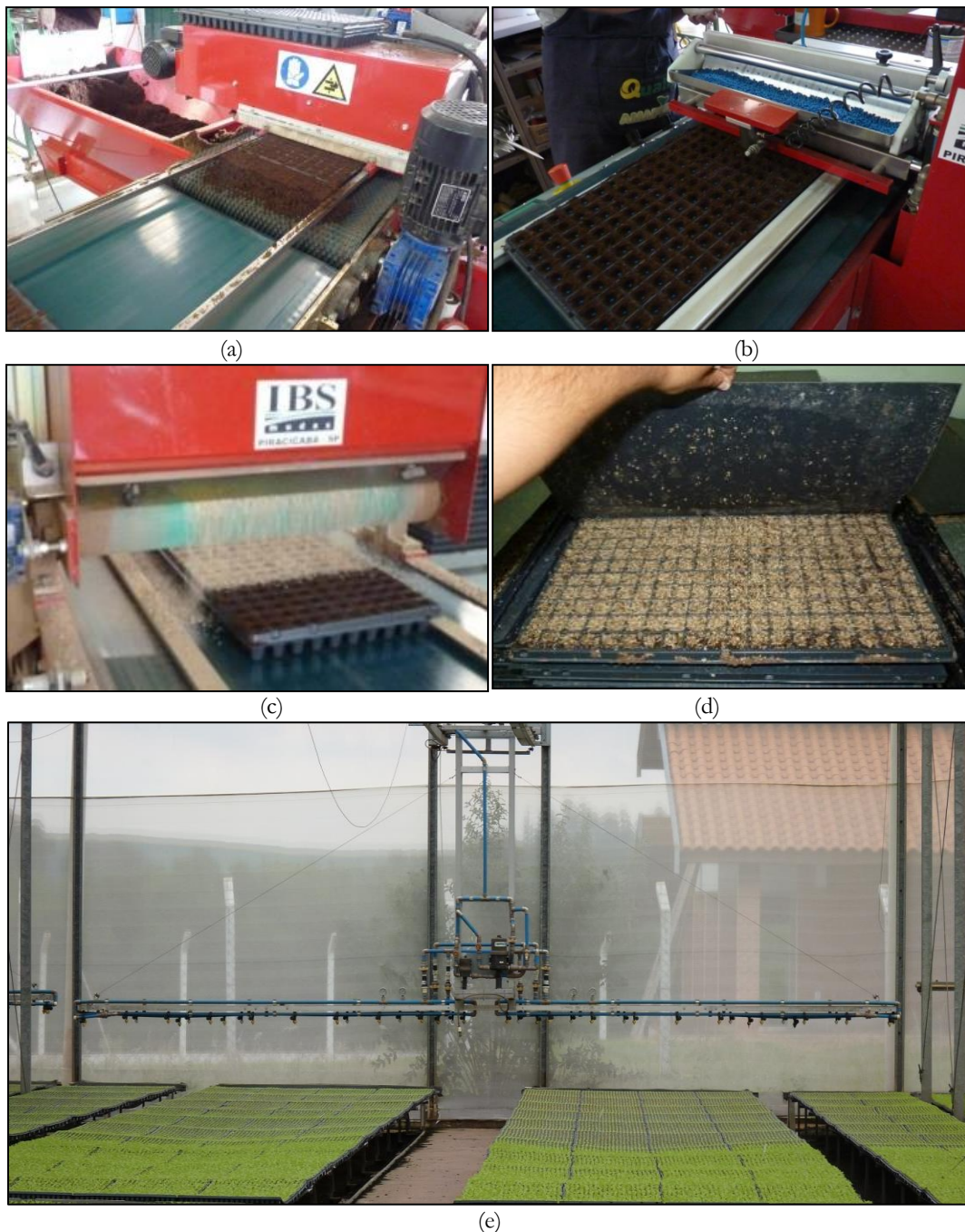


Figura 2. Semeadura de mudas mecanizada em recipientes tipos bandejas de polietileno (a, b, c, d), disposição na câmara de germinação (e) e sistema de irrigação (f).

2.3. Delineamento experimental e tratamentos

Foram realizados dois ciclos experimentais de cada espécie em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, sendo que cada repetição foi composta por duas bandejas de mudas, com um total de 24 parcelas (Figura 4). Os tratamentos foram compostos por cinco níveis de umidade média no substrato no momento da irrigação (A: 80%; B: 70%; C: 60%; D: 50% e E:40% do teor de umidade referentes à capacidade de retenção de água (m/m), descrita como capacidade de recipiente) e um tratamento controle (I) referente ao manejo de irrigação habitual realizado pela empresa, que consistiu de zero a três irrigações por dia segundo o critério do produtor.

A metodologia de determinação da umidade das bandejas, consistiu na amostragem ao acaso de 3 bandejas do lote de plantio de cada ciclo, as quais foram irrigadas até saturação e após cessar a drenagem de água foram pesadas para a obtenção do peso na máxima capacidade de retenção de água. Posteriormente, foram levadas para a estufa de secagem até atingirem peso constante (Tavares et al., 2008; Mantovani et al., 2009).

As bandejas foram mantidas no nível de umidade de 60 a 70% até total emergência das plântulas, por cinco dias. Em seguida, os tratamentos foram iniciados e mantidos até o final do ciclo, isto é, aos 35 e 42 dias após a semeadura (DAS) para alface e tomate, respectivamente.

O teor de umidade (TU) a base de massa na capacidade de recipiente total das bandejas foi determinado por meio da seguinte equação (Minami e Salvador, 2010):

$$TU(\%) = \frac{Mt - Msc - Mb}{Mt} \times 100 \quad (1)$$

Em que: Mt - massa total; Msc - massa do substrato seco; Mb - massa da bandeja vazia (g).

A irrigação foi realizada com sistema mecanizado de microaspersão com barra móvel, fixando a frequência de rega e segundo o teor de umidade nos tratamentos foi variada a lâmina por meio da velocidade com valores de 1,69, 1,52, 1,23, 1,06, 0,81 e 0,68 mm com a finalidade de fazer uma adequada reposição hídrica a partir dos valores de peso crítico até peso máximo dos tratamentos, na média foram feitas de 2 a 3 irrigações por dia.

A água de irrigação apresentou um pH entre 7,0 e 7,5 com condutividade elétrica (CE) de 0,23 a 0,29 durante o crescimento das mudas. A fertirrigação foi realizada três vezes por semana com uma solução nutritiva de pH = 6,5 e EC = 1,7 ds m⁻¹, composta por NPK + micromaster de grado 3:11:38, com garantias: 3% N, 11% P₂O₅, 38% K₂O, 2,5% Mg, 10% S, 12,5% MgSO₄, provenientes das fontes sulfato de potássio, nitrato de potássio, sulfato de magnésio e fosfato monopotássico.

Foram construídos 12 lisímetros de pesagem com uma célula de carga, acoplados por pares aos sistemas eletrônicos para monitoramento, registro e controle da umidade, com um total de 6 controladores. Cada controlador consistiu em uma placa Arduino nano de 256kb e 5V, baseada no microcontrolador ATmega328P (Figura 3), no qual foram integrados dois módulos Ad HX711, cada um acoplado a duas balanças metálicas de lâmina galvanizada de 27 x 54cm (mesmas dimensões das bandejas) com uma célula de carga de capacidade de 10 kg (Figura 4a) e distribuídos de forma aleatória na banca experimental (Figura 4b).

Para visualizar os valores de peso em tempo real, foi colocado um Display Lcd 16x2 fundo azul e para o registro dos pesos a cada 10 minutos; foram acoplados módulos: micro SD SP8266 com um cartão micro SD de 16 Gb e relógio RTS DS3231. Foram utilizados dois leds conectados à placa, e programados para: a) ficarem ligados na faixa de peso ideal para cada tratamento; b) ligação intermitente ao estar embaixo da faixa de peso ideal e; c) desligados

quando ultrapassar a faixa de peso ideal. Os componentes foram soldados a uma placa de fenolite perfurada de 10 x 10 cm e o Arduino conectado a uma fonte de alimentação bivolt e estabilizada 12V-1a (Figura 3).

Por conseguinte, os níveis de umidade no substrato foram controlados manualmente, mas com ajuda eletrônica pelo método gravimétrico, como é descrito nos tratamentos mencionados nas Tabelas 1 e 2. Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c), primeiramente foi determinado o volume de água consumido pelas bandejas em litros (L), subtraindo do valor do peso final após cada irrigação, o peso inicial registrado pelos lisímetros, e o valor diário da somatória destes volumes, foi dividida na área das bandejas em metros quadrados (m²), resultando o valor em mm dia⁻¹.

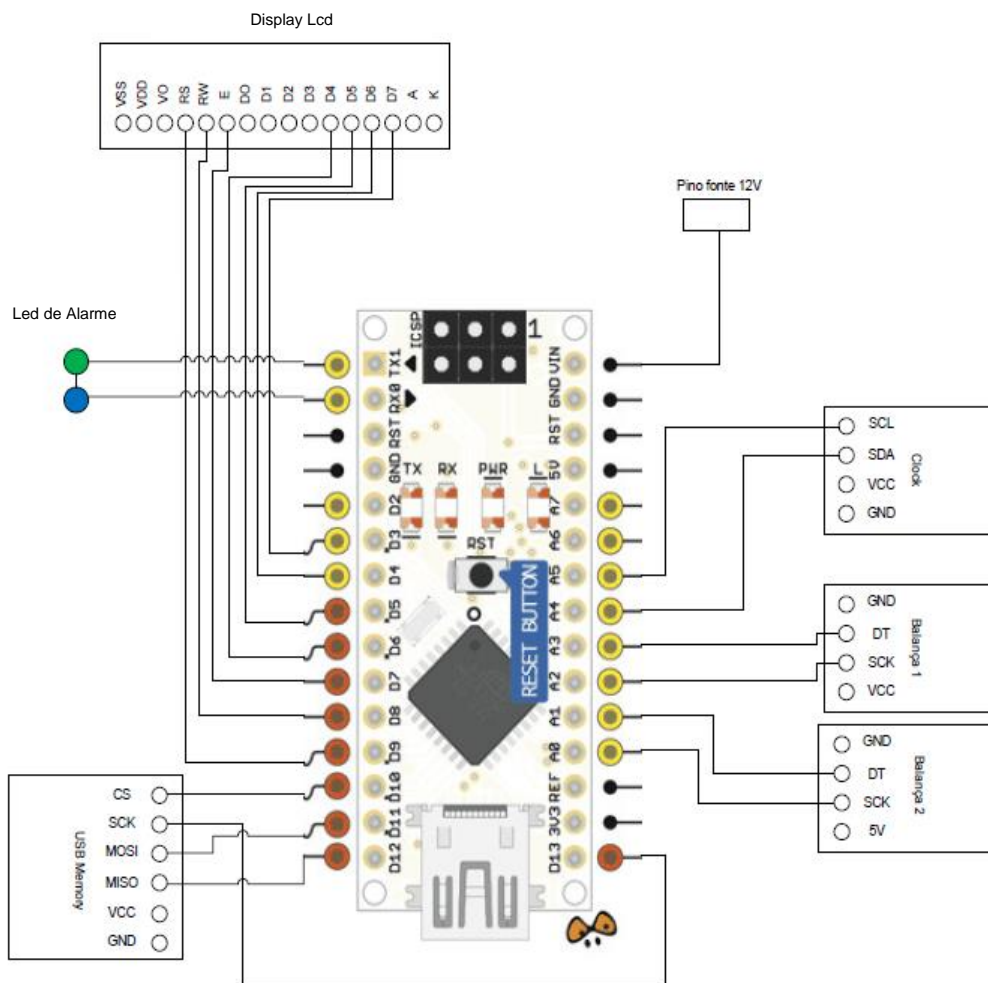
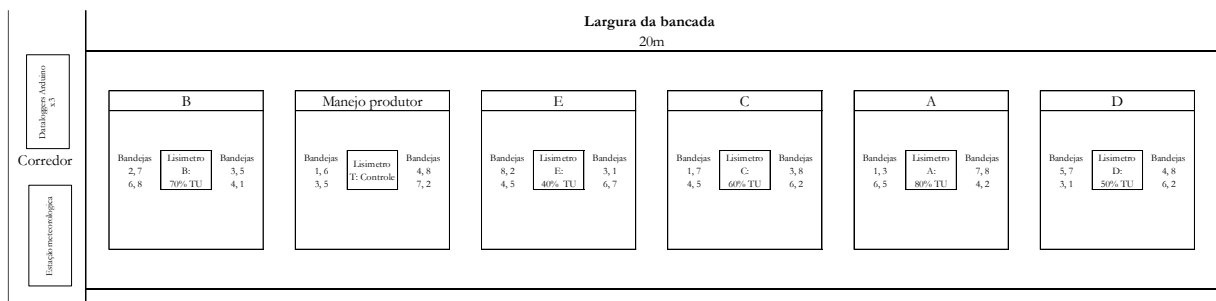


Figura 3. Esquema dos componentes eletrônicos acoplados no Arduino nano, cérebro do sistema eletrônico de monitoramento de umidade.



(a)



(b)

Figura 4. Lisímetros de pesagem instalados na bancada experimental (a) e esquema da distribuição dos tratamentos (b).

Antes de iniciar os experimentos e durante sua condução, os lisímetros foram calibrados individualmente utilizando massas padrões de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 500, 1000, 2000, 3000 e 5000g, segundo a metodologia planteada por Fernandes et al. (2012).

Tabela 1. Descrição dos tratamentos para mudas de alface.

Tratamentos	Teor de umidade (TU) em relação ao peso total na capacidade de recipiente CR (%)			TU médio (%)	Faixa de peso do primeiro ciclo			Faixa de peso do segundo ciclo		
					----- (g) -----					
	Inicial	Final	Media		Inicial	Final	Media			
A	Muito alta	75 - 85*	80	1810	2050*	1930	1633	1850*	1743	
B	Alta	65 - 75	70	1568	1810	1688	1415	1633	1525	
C	Média	55 - 65	60	1327	1568	1477	1198	1415	1307	
D	Baixa	45 - 55	50	1085	1327	1205	980	1198	1090	
E	Muito baixa	35 - 45	40	845	1085	965	762	980	872	
T	Testemunha	Controle	-	Manejo ao critério do produtor sem monitoramento						

*Peso total na capacidade de recipiente (CR) após saturação e drenagem.

Tabela 2. Descrição dos tratamentos para mudas de tomate.

Tratamentos	Teor de umidade (TU) em relação ao peso total na capacidade de recipiente CR (%)		TU médio (%)	Faixa de peso do primeiro ciclo			Faixa de peso do segundo ciclo		
	----- (g) -----			Inicial	Final	Media	Inicial	Final	Media
A	Muito alta	75 - 85*	80	1748	1980*	1865	1615	1830*	1723
B	Alta	65 - 75	70	1515	1748	1631	1400	1615	1508
C	Média	55 - 65	60	1280	1515	1400	1185	1400	1292
D	Baixa	45 - 55	50	1050	1280	1165	970	1185	1078
E	Muito baixa	35 - 45	40	815	1050	930	755	970	880
T	Testemunha	Controle	-	Manejo ao critério do produtor sem monitoramento					

*Peso total na capacidade de recipiente após saturação e drenagem.

2.4. Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) e do Coeficiente da cultura (K_c)

Para a estimativa da evapotranspiração de referência - ET_o foi empregada a equação de Penman-Monteith (Equação 2) método padrão proposto pela FAO (Allen, et al. 1998), usando os dados de uma estação meteorológica automática localizada dentro da estufa, que foi programada para registrar temperatura (T), umidade relativa (UR), radiação total líquida diária (Q_g) e velocidade do vento (U₂). Foram empregados um sensor HMP155A-L protegido em abrigo multiplacas para o registro da T e UR, e para o registro da radiação total líquida foi utilizado um pirômetro LP02. A velocidade do vento foi medida com um anemômetro de veleta, mas durante os experimentos os valores foram próximos de zero. Portanto se considerou como valor médio de 0,5 m s⁻¹ obtido de prévios trabalhos em estufa (Barbosa, 2015), para facilidade dos cálculos de ET. Os sensores foram instalados a 2 m do nível do solo do lado do experimento, e acoplados em um datalogger CR800 programado para registrar dados a cada 15 minutos (Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA). Também foram utilizados os dados do posto meteorológico da ESALQ, localizado a 10,78 km de distância da área experimental. A equação de Penman-Monteith parametrizada para estimativa da evapotranspiração de referência utilizada foi:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (DPV)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (2)$$

em que:

- ET_o - Evapotranspiração de referência, em mm dia⁻¹;
- R_n - Saldo de radiação na superfície, em MJ m⁻² dia⁻¹;
- G - Fluxo de calor no solo, em MJ m⁻² dia⁻¹;
- T - Temperatura média do ar a 2 m de altura, em °C;
- U₂ - Velocidade do vento a 2 m de altura, em m s⁻¹;
- DPV - Déficit de pressão de vapor, em kPa;
- Δ - Declividade da curva de pressão de vapor, em kPa °C⁻¹; e
- γ - Constante psicrométrica, em kPa °C⁻¹;

ET_o diária (mm dia⁻¹) foi calculada desprezando o (G) fluxo diário de calor no solo, pois sua magnitude é relativamente pequena em períodos de 24h e utilizando a velocidade do vento a 2,0 m (U₂) como 0,5 m s⁻¹ (Allen et al. 1998). Com os valores diários da evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura, foram calculados os coeficientes de cultura referente à fase de crescimento das plântulas (Girardi et al., 2016), como descrito na equação 3 proposta Doorembos e Kassam, (1979):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o}$$

Em que: E_{Tc} é a evapotranspiração da cultura e E_{To} a evapotranspiração de referência, ambas em mm dia^{-1} . (3)

2.5. Variáveis analisadas durante o experimento

O crescimento das plântulas foi avaliado por meio de colheitas aos 7, 14, 21, 28 e 35 dias após a semeadura (DAS) para o cultivo de alface e aos 7, 14, 21, 28, 35, 42 DAS para o tomate, com a avaliação de 20 plântulas por repetição. Foram determinadas: massa fresca e seca da parte aérea e das raízes. Para isso as plantas foram coletadas e cortadas com tesoura de mão, para separar os diferentes órgãos, pesadas em fresco e seguidamente colocadas em saquinhos de papel para levar a estufa com circulação forçada de ar a 65°C até peso constante.

2.6. Variáveis no momento do transplante

2.6.1 Crescimento das mudas

No momento de transplante das mudas de alface (35 DAS) e tomate (42 DAS) foram coletadas 20 plântulas por repetição para a determinação de: massa fresca e seca da parte aérea e das raízes, altura (h), diâmetro do caule para tomate e área foliar (AF), registrada com medidor de área foliar (Licor LI-3100C) e calculado o Índice de Área Foliar (IAF).

2.6.2 Desenvolvimento do sistema radicular

Para avaliar o desenvolvimento do sistema radicular, foram utilizadas 10 plantas por repetição previamente lavadas e colocadas em solução de etanol a 20%. As raízes foram escaneadas no equipamento EPSON X acoplado ao software WinRhizo® (Regent Instrument Inc., 2021). Os dados obtidos foram referentes ao comprimento total (cm), área projetada (cm^2), área superficial (cm^2), diâmetro médio (mm), volume (cm^3), número de pontas das raízes e altitude (maior comprimento contínuo de raiz).

2.6.3 Medidas de fotossíntese

Com um medidor portátil de troca gasosa (Li-6400 XT da LiCOR-Inc, Lincoln, Nebraska, EUA) entre as 9:00 e 11:00h em dia ensolarado, foram determinadas a taxa fotossintética líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e concentração intracelular de CO_2 (iC_i) no momento do transplante. O equipamento foi ajustado para manter a concentração de CO_2 de $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para alface e $600 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para tomate, e a densidade de fluxo fotossintético ativo (PPFD) de 1200 e $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

2.6.4 Análise de imagens multiespectrais

As capturas de imagens multiespectrais foram realizadas em 30 e 24 plantas por repetição, para tomate e alface, respectivamente. Foi utilizado o SeedReporter™ (PhenoVation B.V., Wageningen, Netherlands) o qual consiste em um gabinete compacto contendo um computador incorporado e um software de aquisição de imagens, uma câmera CCD de 6 Mp com níveis de cinza de 14 bits por pixel. A saturação do processo de fotossíntese foi proporcionada por 36 fontes LED âmbar de alta intensidade (pico a 620 nm), impondo um flash de luz intensivo de $6.320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com a tecnologia de curva de indução Kautsky (Strasser et al., 1995). Antes da captura das imagens, as mudas foram mantidas no escuro por 30 min com o objetivo de que todos os centros de reação estivessem fisiologicamente abertos e otimizados para receberem os elétrons dos fótons.

As folhas foram posicionadas a 25 cm dos LEDs. Um filtro de interferência (730 nm) bloqueia as fontes LED e transmite a fluorescência de clorofila do tecido da planta para o chip CCD. Imagens de alta resolução (2448×2448 pixels) das mudas no escuro foram adquiridas para a atividade fotossintética através do cálculo da fluorescência variável sobre o nível de saturação da fluorescência (FV/FM). Usando o software SeedReporter™ v. 5.4.6., foram determinados o índice de antocianinas (AriIdx) e índice de clorofilas (ChlIdx), fluorescência de clorofilas a 710 nm (Chl710) e eficiência do fotossistema II (Fv/Fm), que foi dada por $Fv/Fm = Fm (Fm - F0) / Fm$. As imagens foram analisadas por meio do Software CFTI – Analysis (versão 5.4.5), que permitiu a retirada de ruídos de cada imagem por meio de uso de filtros.

2.6.5 Teor de clorofila e carotenoides

Os teores de clorofila e carotenoides foram determinados por espectrofotometria de fluorescência também aos 35 e 42 DAS, usando a metodologia para extração de clorofila sem maceração descrita por Hiscox et al., (1978). Para isso, 20 mg de massa fresca de folhas foram colocados em tubos de ensaio e adicionados 5 ml do extrator dimetilsulfóxido (DMSO). Em seguida, as amostras foram mantidas em temperatura ambiente por 48 h sem a presença de luz. Finalmente, 3 ml de sobrenadante foi retirado e colocado em cubeta de vidro para realizar a leitura com o espectrofotômetro (BIOCHROM, Libra S22). Para a determinação dos teores de clorofilas a e b, e carotenoides, as leituras foram realizadas nos comprimentos de ondas de 665, 649 e 480 nm. Por meio das equações propostas por Wellburn (1994) foram determinados os teores desses pigmentos em $\mu\text{g g}^{-1}$ de material fresco.

2.6.6 Teores de macronutrientes nas folhas

As folhas coletadas foram posteriormente secadas e moídas para a realização da digestão sulfúrica, conforme metodologia de Kjeldahl (Malavolta et al., 1989) para a determinação do teor de nitrogênio - N (g kg^{-1}). Também, foram determinados segundo a mesma metodologia fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio e enxofre (S).

2.7 Eficiência do uso de água

A eficiência do uso da água (EUA) foi determinada pela relação entre a produção de massa seca total (Y) em gramas e a quantidade de água (W) consumida em L, durante o crescimento das mudas e expressa em g L⁻¹. Como se evidencia na Equação 4:

$$EUA = \frac{Y}{W} \quad (4)$$

2.8 Análises estatísticas

Inicialmente, os dados coletados foram padronizados, antes da realização da análise multivariada. Foram testadas as pressuposições estatísticas, onde se determinou se os dados apresentavam resíduos com distribuição normal e variâncias homogêneas. Os dados que não atenderam as pressuposições foram transformados. Em seguida, foram realizadas análises de agrupamento hierárquica pelo método K-médias, sendo K o número de grupos indicados no dendrograma pelo método de Ward, com o objetivo de visualizar os grupos de tratamentos e realizar a comparação múltipla de médias entre grupos com o hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância. Os componentes principais foram gerados a partir dos autovalores da matriz de covariância obtida dos dados originais, para visualizar as variáveis no plano (bidimensional) e interpretar o poder discriminatório em cada componente principal. Todas as análises e gráficos foram realizadas no software R-4.1.2 (R Core Team, 2021).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dados meteorológicos, perfis da irrigação, estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente da cultura (K_c)

Durante o primeiro período experimental, houve oscilações de temperatura entre 20 e 29°C, e umidade relativa entre 54 e 89 %, com médias de 24,6 °C e 74,0 %, respectivamente. A radiação solar variou entre 3,2 e 9,1 MJ m⁻² dia⁻¹ com uma média de 6,1 MJ m⁻² dia⁻¹ dentro da estufa (Figura 5c). No exterior, foram registrados os valores médios de 24 °C, 76,6 % e 21,2 MJ m⁻² dia⁻¹.

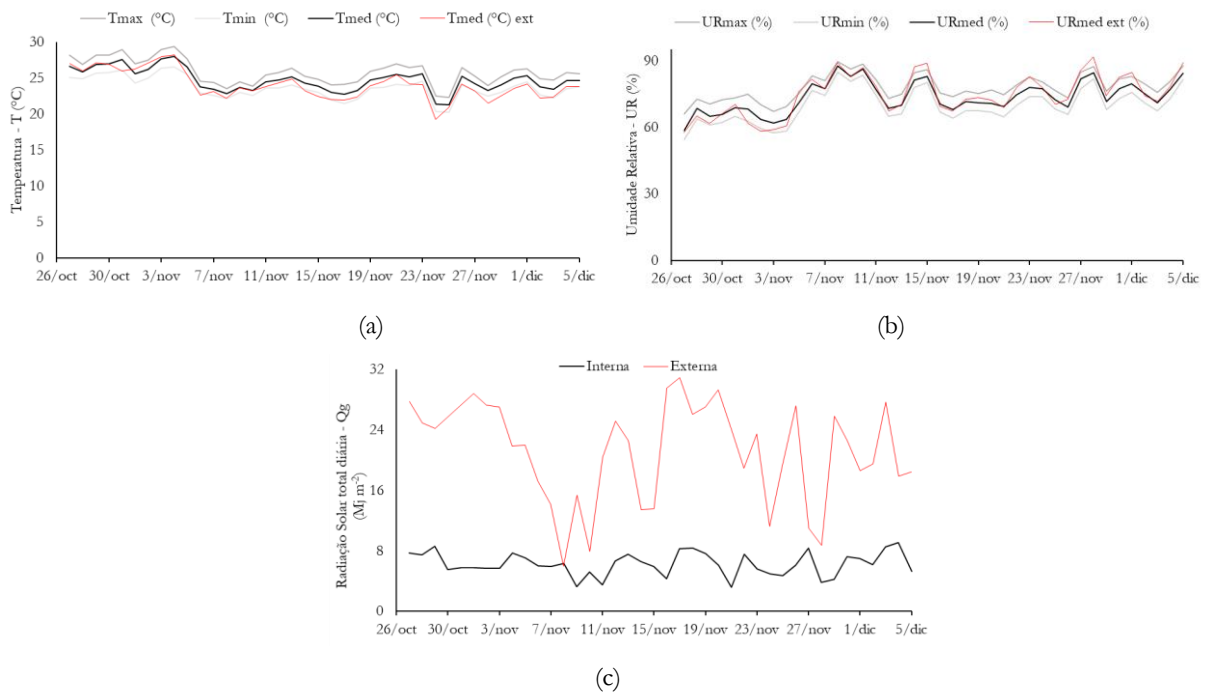


Figura 5. Temperatura (a), umidade relativa (b) e radiação solar líquida (c) externas e internas durante o primeiro ciclo de cultivo.

No monitoramento da umidade do substrato para o primeiro ciclo de alface, o lisímetro do tratamento controle evidenciou quedas e elevações pronunciadas nos valores de peso, que corresponderam a altas variações na umidade (40 a 85%), de forma que essas plantas foram submetidas a períodos de déficit hídrico e encharcamento (Figura 6a). A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi de 86, 92, 83, 85, 78 e 82 mm por ciclo⁻¹, com uma média diária de 3,08, 3,27, 2,97, 3,04, 2,79 e 2,94 mm dia⁻¹ nos tratamentos de umidade de 80, 70, 60, 50 e 40 %, e controle (Figuras 6a - 6f). A evapotranspiração de referência (ET_o - PM) deu como resultado 146 mm (174% da ET_c), com uma de média de 5,04 mm dia⁻¹ e valores entre 4,57 e 5,36 mm dia⁻¹. Assim, o K_c oscilou entre 0,17 e 1,04 com uma média global de 0,58 (Figura 7b).

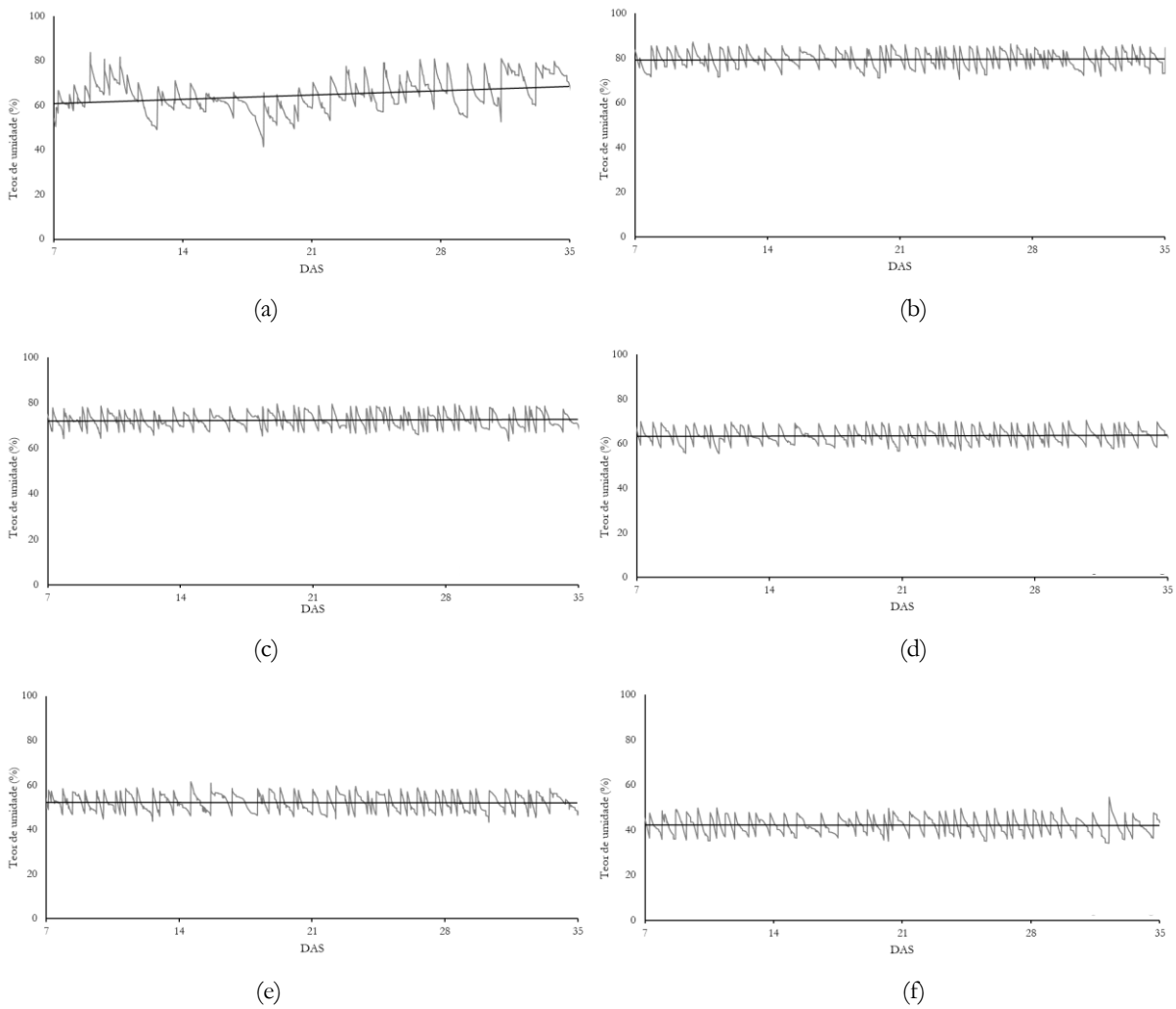


Figura 6. Perfis de irrigação construídos a partir de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o primeiro cultivo de alface.

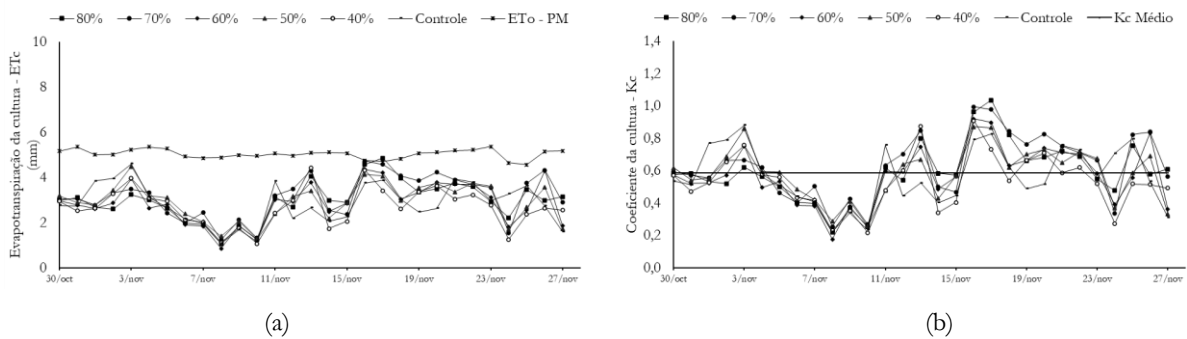


Figura 7. Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência (ETo - PM) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o primeiro cultivo de alface.

Para o primeiro ciclo de tomate (período experimental de 36 dias), a umidade do tratamento controle mostrou oscilações acentuadas. Foram registrados teores de umidade entre 50 e 85% (Figura 8a), devido ao manejo habitual sem monitoramento da irrigação feito pelo produtor; portanto, houve períodos de saturação hídrica e déficit hídrico. Para os demais tratamentos a irrigação foi controlada; e assim mantidas as faixas de umidade estabelecidas para cada tratamento (Figuras 8b - 8f). Foram apresentados valores de ET_c de 93, 96, 97, 91, 92 e 92 mm ciclo⁻¹, e 2,59, 2,65, 2,70, 2,53, 2,56 e 2,56 mm dia⁻¹ nos tratamentos controle, 80, 70, 60, 50 e 40 % da umidade, respectivamente (Figura 9a). Por tanto, a média de ET_c geral foi de 94 mm ciclo⁻¹ ou 2,60 mm dia⁻¹, e a ET_o -PM foi de 182 mm ciclo⁻¹ (194% a ET_c), com valores entre 4,57 e 5,37 mm dia⁻¹ e média de 5,06 mm dia⁻¹ (Figura 9a). Por tanto, o K_c oscilou entre 0,20 e 0,83, com uma média geral de 0,51 (Figura 9b).

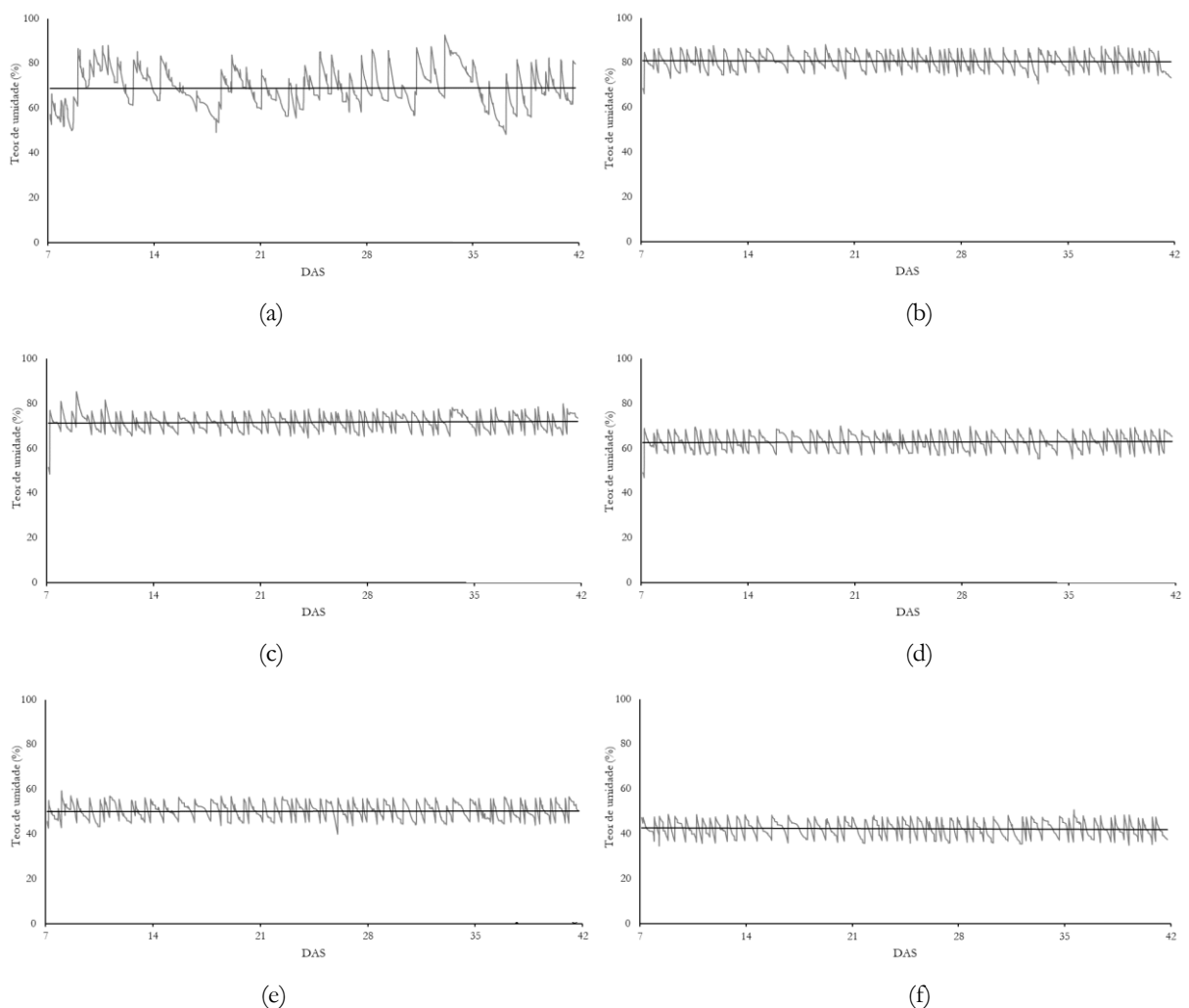


Figura 8. Perfis de irrigação construídos a partir de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o primeiro cultivo de tomate.

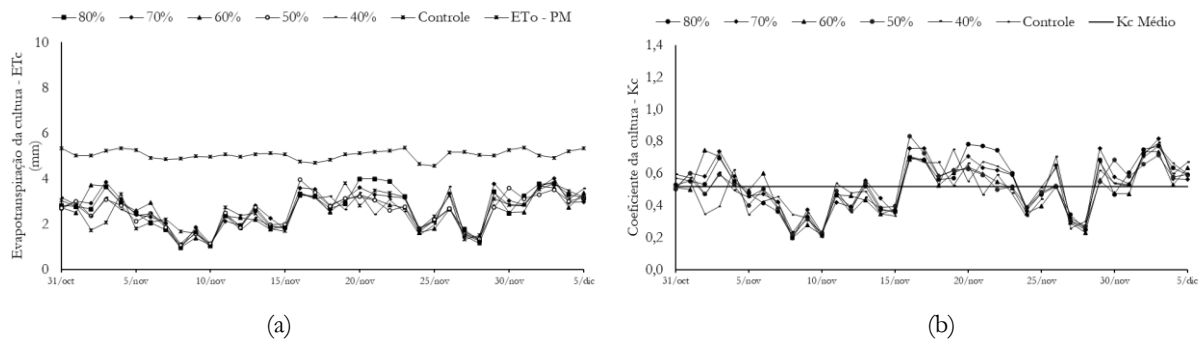


Figura 9. Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência (ETo - PM) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o primeiro cultivo de tomate.

Durante o segundo período experimental, as oscilações de temperatura e umidade relativa estiveram entre 19,3 e 32,2 °C e 46 - 84 %, com valores de média de 24,1 °C e 65,4 %, respectivamente (Figura 10a, 10b). Os valores de radiação solar estiveram entre 1,3 e 7,0 MJ m⁻² dia⁻¹, com uma média de 4,9 MJ m⁻² dia⁻¹ dentro da estufa (Figura 10c). No exterior, foram registradas médias de 23,2 °C, 65,5 % e 21 MJ m⁻² dia⁻¹ de temperatura, umidade relativa e radiação solar, respectivamente.

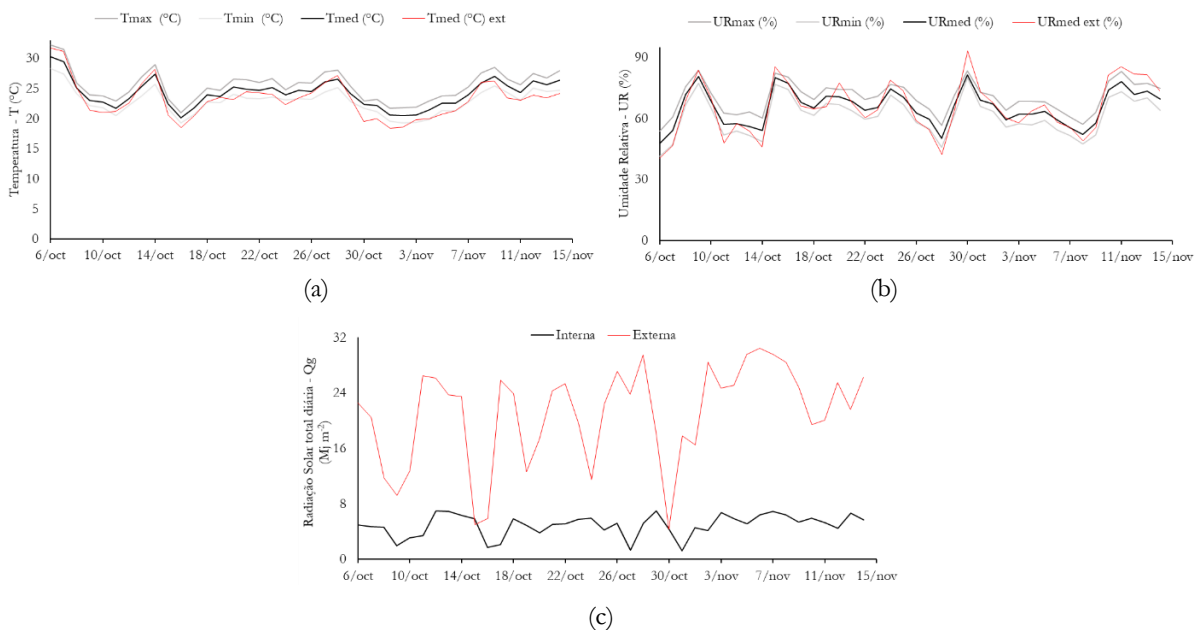


Figura 10. Temperatura (a), umidade relativa (b) e radiação solar líquida (c) externas e internas durante o segundo ciclo de cultivo.

Da mesma forma que no primeiro ciclo de alface, neste segundo ciclo o lisímetro do controle evidenciou oscilações pronunciadas nos valores de peso, com um teor de umidade entre 60 e 85% (Figura 11a), durante um período de 29 dias (Figuras 11a). A irrigação foi controlada nos demais tratamentos, e se manteve a umidade nas faixas

de peso estabelecidas para cada um (Figuras 11b - 11f). Portanto, os valores da ET_c foram de 86, 88, 82, 85, 87 e 77 mm ciclo⁻¹, e 2,97, 3,03, 2,84, 2,92, 2,99 e 2,66 mm dia⁻¹ para o controle, com 80, 70, 60, 50 e 40 % de umidade, respectivamente (Figura 12a). Assim, a ET_c média foi de 84 mm ciclo⁻¹ e 2,9 mm dia⁻¹, e a ET_o -PM foi de 127 mm ciclo⁻¹ (151% a ET_c), com valores entre 3,82 e 4,78 e uma média de 4,39 mm dia⁻¹ (Figura 12a). O K_c oscilou entre 0,12 e 1,23 com uma média global de 0,67 (Figura 12b).

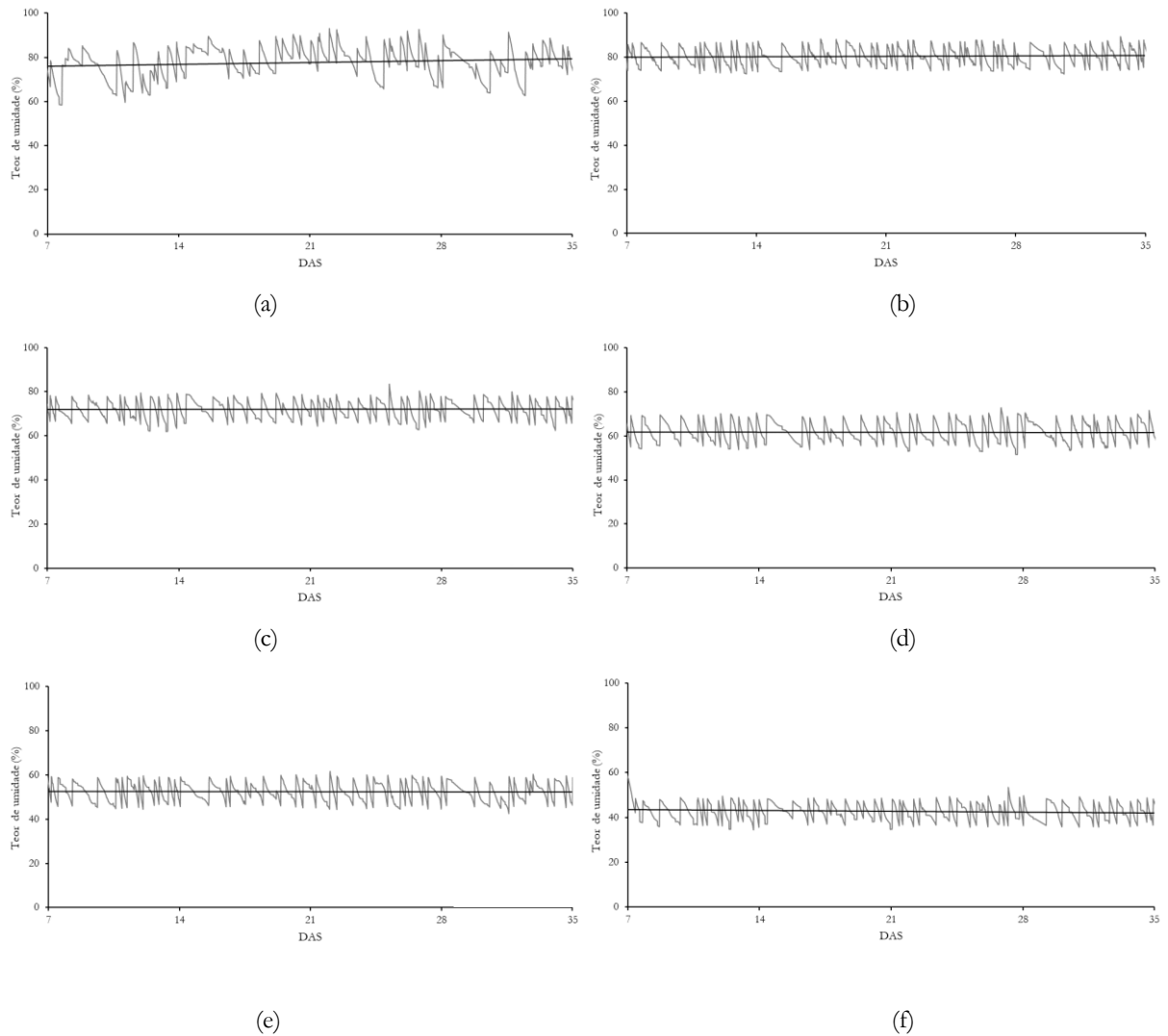


Figura 11. Perfis de irrigação construídos de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o segundo cultivo de alface.

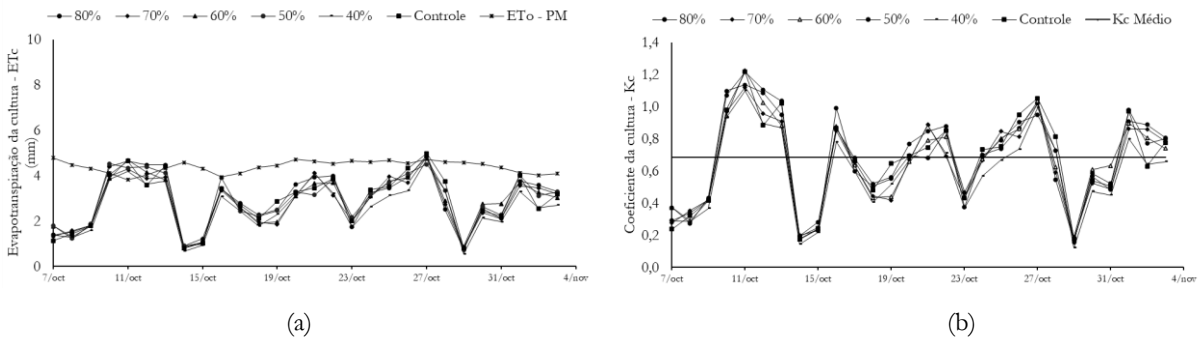
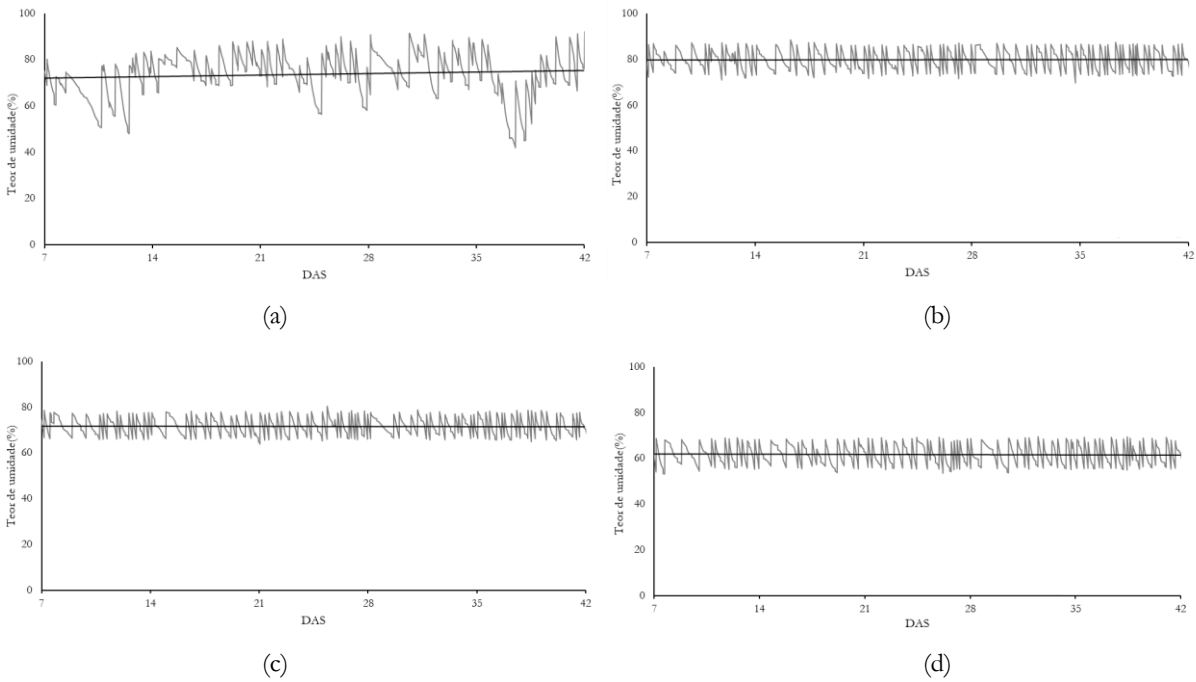


Figura 12. Evapotranspiração da cultura (ETc), evapotranspiração de referência (ETo - PM) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o segundo cultivo de alface.

Também, no segundo ciclo de tomate, os valores de umidade do controle ficaram entre 40 a 85% (Figura 13a), referentes às irrigações não controladas no período de 37 dias. Os demais tratamentos foram mantidos nas faixas de umidade preestabelecidas (Figuras 13b - 13f), apresentando-se a ETc de 120, 132, 123, 125, 114 e 111 mm ciclo⁻¹, sendo em 3,23, 3,58, 3,32, 3,39, 3,08 e 3,00 mm dia⁻¹ respectivamente, no controle, 80, 70, 60, 50 e 40 % do TU (Figura 14a). Assim, a ETc média foi de 121 mm ciclo⁻¹ e 3,27 mm dia⁻¹, e a ETo-PM foi de 160 mm ciclo⁻¹ (134% a ETc), com valores entre 3,82 e 5,17 mm dia⁻¹ e uma média de 4,34 mm dia⁻¹ (Figura 14a). Diante disso, o Kc oscilou entre 0,17 e 1,38 com uma média geral de 0,76 (Figura 14b).

Com as informações anteriormente apresentadas, para a mudas de alface e tomate, se determinaram valores medios de Kc de 0,63 e 0,65.



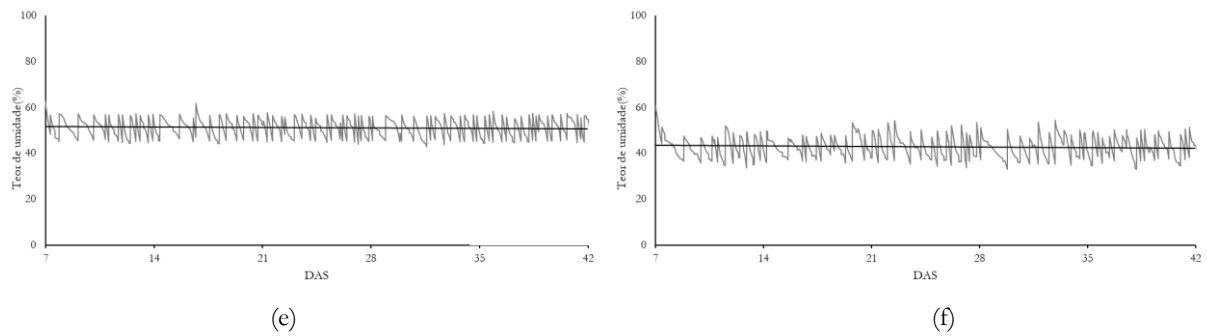


Figura 13. Perfis de irrigação construídos de dados de pesagem a cada 10 minutos das 6:00 às 19:00h, nos tratamentos controle (a), 80 (b), 70 (c), 60 (d), 50 (e) e 40 (f) % de umidade no substrato durante o segundo cultivo de tomate.

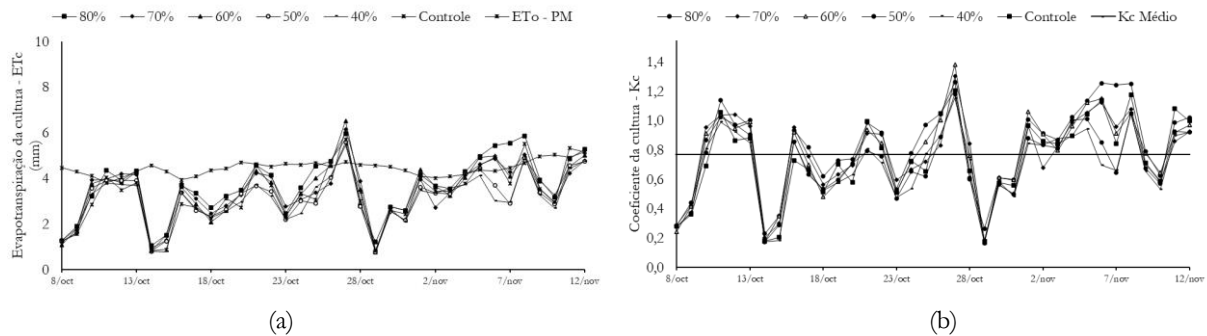


Figura 14. Evapotranspiração da cultura (ETc) evapotranspiração de referência (ETo) (a) e coeficiente da cultura - Kc (b) durante o segundo cultivo de tomate.

O sistema de resfriamento evaporativo manteve a temperatura abaixo de 30 °C (Figura 5a e 10a), e permitiu oferecer boas condições dentro da estufa para o crescimento das mudas em ambos os períodos experimentais. Antônio et al. (2004) indicaram que a faixa entre 20 e 30 °C é considerada adequada para a germinação, brotação e desenvolvimento da maioria das espécies, já que a temperatura máxima tolerável pela cultura da alface está em torno de 30 °C e a mínima, em torno de 6 °C. Nos estudos de Brandão Filho e Callegari (1999) se recomendam temperaturas diurnas entre 25 e 30 °C para o crescimento de tomateiro. Ramos (2009), sugere as temperaturas entre 23 e 30°C durante o dia e UR em torno de 70 % para o ótimo desenvolvimento do tomateiro.

Com relação ao ambiente externo, a T e UR médias foram semelhantes às apresentadas no interior da estufa; portanto, destacam-se valores levemente superiores de T e levemente inferiores de UR (Figuras 5 e 10). Esta condição do ambiente é semelhante com a descrita por Guiselini et al. (2004), que encontraram valores de temperatura e umidade relativa média entre 20 e 30°C e 62 e 87%, dentro de estufa com plástico transparente e malha termo-refletora interna. Do mesmo modo, Pezzopane et al., (1995) indicaram que dentro das estufas agrícolas a T é normalmente superior que a registrada no ambiente externo, e considerando que a UR é inversamente proporcional à T, usualmente os valores de UR são menores no ambiente interno.

As faixas de umidade relativa evidenciadas durante os experimentos mostraram ser adequadas para as plantas, pois não houve valores muito baixos (< 30 %) ou muito altos (> 95%) que poderiam estar envolvidos em indução de alterações fisiológicas como redução da fotossíntese (Furlan et al., 2001). Como era esperado, a radiação solar líquida dentro da estufa foi menor pelo efeito do plástico e da tela Aluminet (Figura 10c e 5c), com valores

correspondentes a 29 e 23% do total da radiação exterior, pois foram registradas médias de 21,2 e 21,0 MJ m² dia⁻¹ para cada período avaliado pelo posto meteorológico da ESALQ. Ramos (2009) indicou que a radiação incidente no ambiente externo da estufa deveria estar em torno de 14 e 16 MJ m² dia⁻¹ para que a cultura do tomateiro produzisse sem restrições luminosas. Portanto, a intensidade luminosa durante os experimentos foi a adequada, ao considerar que é um sistema de produção de mudas de hortaliças. Os valores de radiação determinados nesses experimentos, concordam com os obtidos por Hoelman et al. (2017), pois esses observaram uma radiação solar global média de 6,6 e 4,3 MJ m² dia⁻¹ em dois ciclos experimentais, quando foi utilizado o plástico anti-UV associado à tela termo-refletora no interior da estufa.

Nas Figuras 6, 8, 11 e 13 são apresentados os gráficos das leituras dos lisímetros da pesagem, relacionadas com as oscilações causadas pela evapotranspiração (ETc) e irrigação nos tratamentos. Estudos de Silva et al., (1999), Carvalho et al., (2007) e Fernandes et al., (2012) indicaram que os lisímetros de uma célula de carga são recomendados pelo seu alto grau de precisão na determinação da ETc. Nesse trabalho igualmente os lisímetros evidenciaram um ótimo desempenho, pois as leituras dos valores a cada 10 minutos foram coerentes quando houve redução da massa nas bandejas pela ETc, e incremento da mesma pela irrigação. De igual maneira que no trabalho de Carvalho et al., (2013) verificou-se a estabilidade das leituras, as quais se equilibraram entre um e três segundos após a adição da massa (irrigação), pelo que os dados adquiridos foram confiáveis. Em concordância com os resultados obtidos nesse trabalho, utilizando lisimetria de pesagem, Gervasio et al. (2014) conseguiu medir com precisão o consumo hídrico em plantas de helicônia em ambiente protegido, o que diminuiu o custo dos equipamentos para monitoramento da irrigação. No interior da estufa, a velocidade do vento foi constante e próxima a zero. Deste modo as leituras dos lisímetros foram precisas, pois não houve influência do vento, como indicou Howell et al. (1995) que descreveram que as velocidades do vento acima de 5 m s⁻¹ podem afetar as leituras de peso. Assim, para condições de campo aberto o uso desses equipamentos pode não ser o adequado, por causa de seu pequeno tamanho, pois as células de carga empregadas foram de 10 kg de capacidade e as leituras foram feitas em escala de contagem de gramas.

Segundo o exposto, os tratamentos que foram mantidos nos menores percentuais de umidade (40 e 50 %) evidenciaram os menores valores da ETc em todos os períodos experimentais. Este resultado concorda com Girardi et al. (2016), que determinaram a ETc e Kc em *Alstroemeria* por lisimetria de pesagem em cultivo protegido. Esses autores verificaram que o tratamento com maior umidade no vaso (90 %) teve o maior consumo de água, o que pode ser devido ao incremento da condutividade hidráulica quanto maior a umidade no meio de crescimento, pois há maior facilidade na transpiração pelas plantas e da evaporação da água do substrato, incrementando-se assim o consumo hídrico (De Jong Van Lier, 2020).

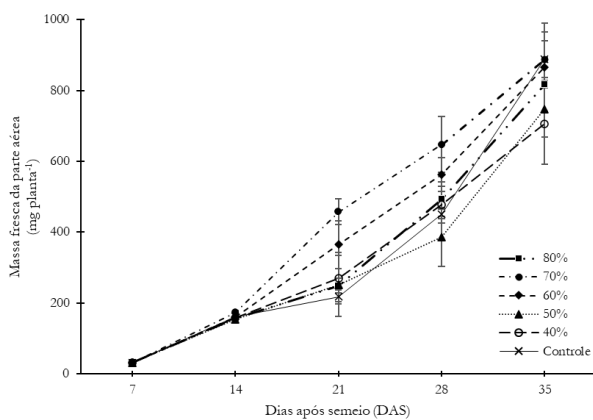
A ETo - PM se caracterizou por valores médios entre 4 e 5 mm dia⁻¹; em algumas ocasiões os valores da ETo-PM foram superiores em relação à ETc registrada pelos lisímetros (entre 2,6 e 3,3 mm dia⁻¹), de forma semelhante como mencionado por Albuquerque et al. (2012) e Sharma et al., (2015). Albuquerque et al. (2012) reportaram 1,97 mm dia⁻¹ como média da ETc, e valores de ETo-PM entre 3 e 5 mm dia⁻¹. De modo geral, os valores de ETc determinados neste trabalho foram duas vezes maiores aos encontrados pelos autores citados, devido ao fato de que esse experimento foi conduzido depois do transplante da cultura do pimentão e em campo aberto, e nessas condições há menos plantas por área. No período de outubro a dezembro, Alves et al., (2004)¹ e Barbosa (2015) encontraram valores da ETo parecidos aos calculados neste trabalho e evidenciaram uma ETo-PM média de 4,36 mm dia⁻¹. Se destaca que esses autores conduziram os experimentos em casa de vegetação na estação experimental da ESALQ, em condições que foram semelhantes às aplicadas nesses experimentos. Doorenbos e Kassam (1994) reportaram valores de médias de Kc para tomate, próximos aos evidenciados nestes experimentos; eles indicaram uma variação do Kc

entre 0,85 e 0,90. No caso de Santos et al., (2015), na determinação do Kc de diferentes cultivares de alface por meio de minilímetros de percolação e pesagem, foram encontrados valores de 0,5 a 0,6 na primeira semana de plantio, os quais concordaram com os Kc (0,59) observado neste trabalho para as mudas de alface.

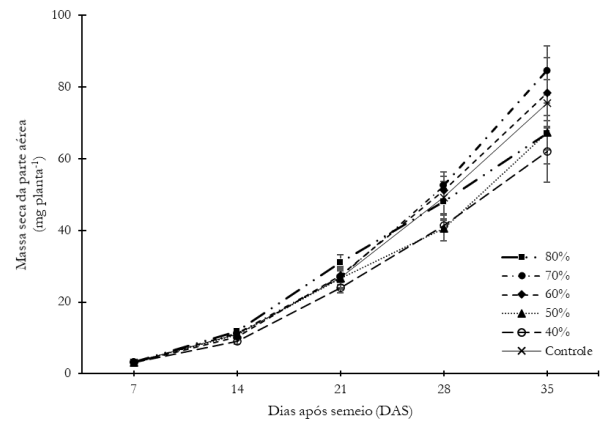
3.2 PRODUÇÃO DE MUDAS DE ALFACE

3.2.1 Variáveis de crescimento analisadas durante o experimento

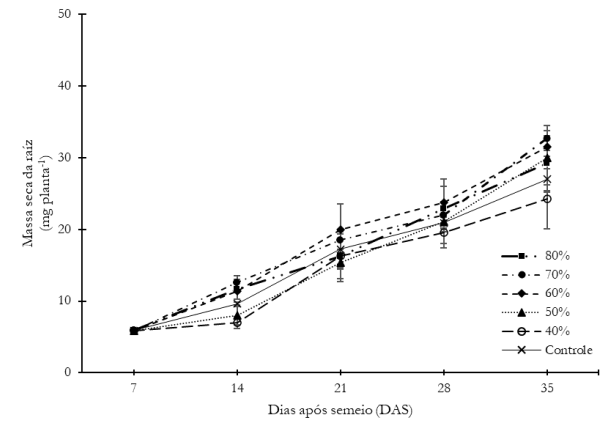
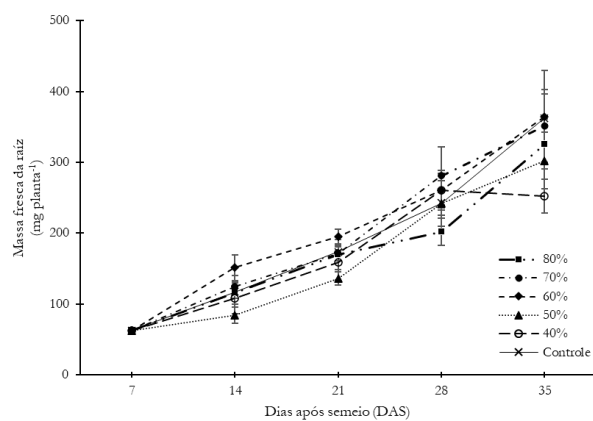
No primeiro ciclo de alface, aos 5 DAS se observou a emergência total das plântulas. Assim, nesse momento foram aplicados os tratamentos e a partir do 7 DAS foram iniciadas as amostragens de plantas até o final do ciclo (35 DAS). Para todos os tratamentos houve aumento do crescimento e do índice da área foliar até o período de transplante (Figura 15). Em geral, os valores de massa fresca e seca foram menores no tratamento de 40 % de umidade (Figura 15a – 15g) com relação aos outros níveis e em comparação com o controle. Cabe ressaltar que o tratamento de 70% de umidade se manteve em uma curva acima das apresentadas pelos outros tratamentos durante o período de crescimento e para todas as variáveis analisadas neste ciclo (Figuras 15a – 15g).



(a)



(b)



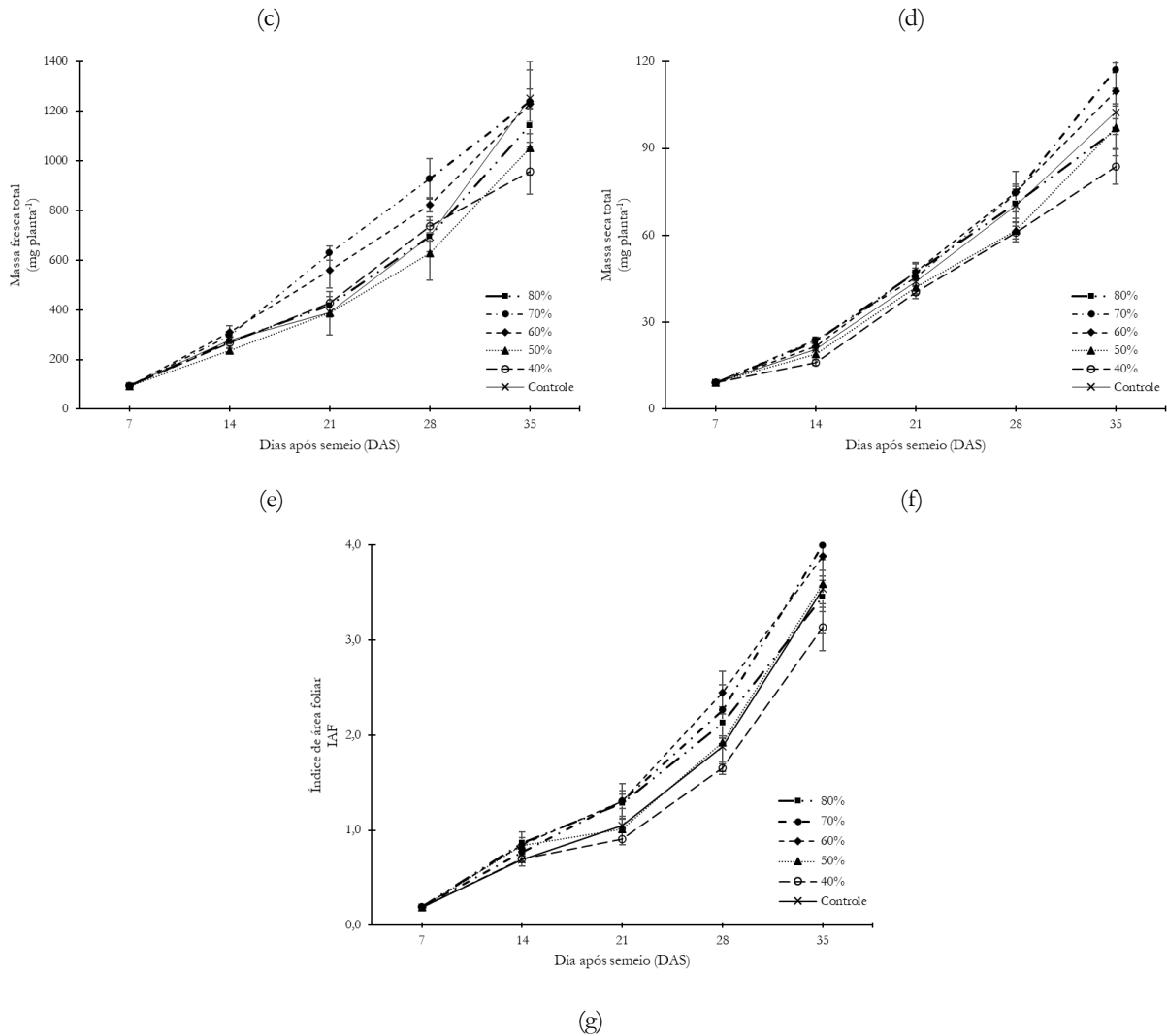
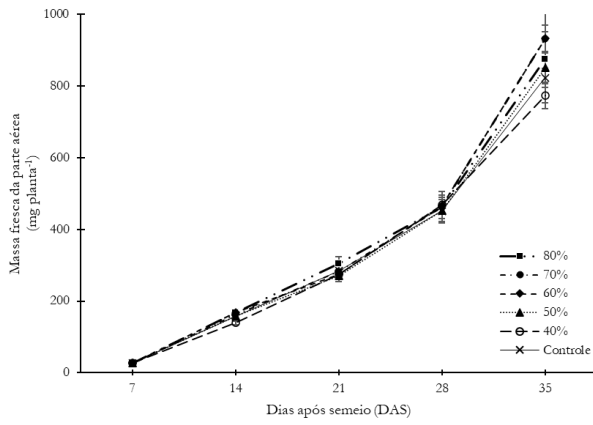
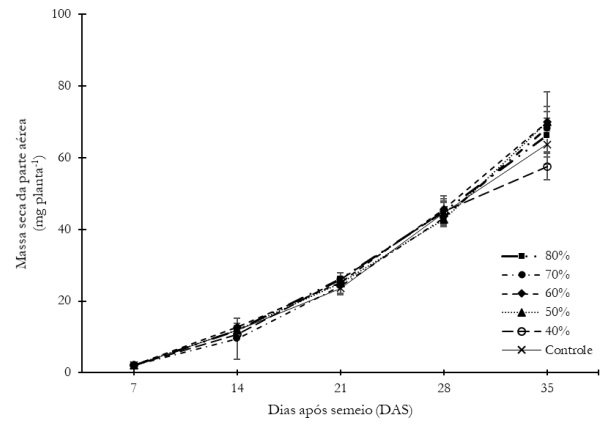


Figura 15. Massa fresca (a, c, e) e seca (b, d, f) da parte aérea, da raiz e índice de área foliar (g) no primeiro cultivo de alface.

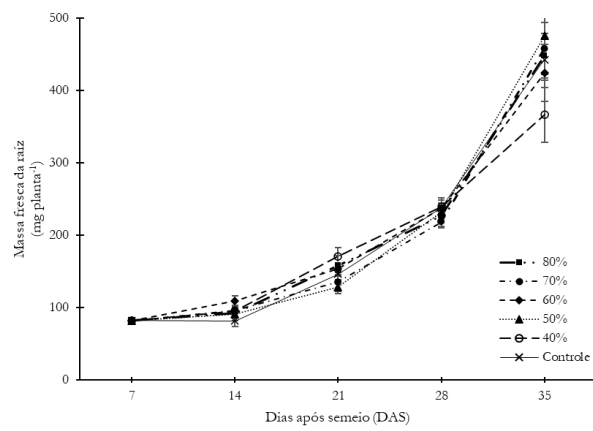
No segundo cultivo de alface, aos 6 DAS observasse a total emergência, e a partir dos 7 DAS foram aplicados os tratamentos com o início das amostragens a partir da primeira semana (7 DAS) até o período de transplante (35 DAS). Para todos os tratamentos houve aumento do crescimento e do índice de área foliar até o período de transplante. Observam-se curvas de crescimento próximas entre elas; somente no final do ciclo se evidencia que o tratamento de 40 % do TU, teve queda em relação aos outros tratamentos. Os níveis de umidade de 60 e 70% evidenciaram curvas por cima dos demais durante o período avaliado e na maioria as variáveis avaliadas (Figuras 16a – 16g).



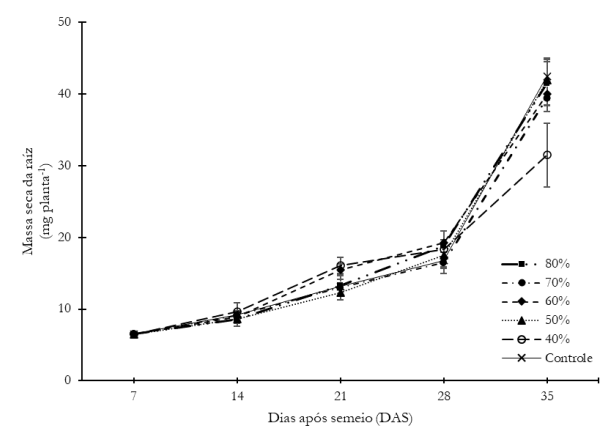
(a)



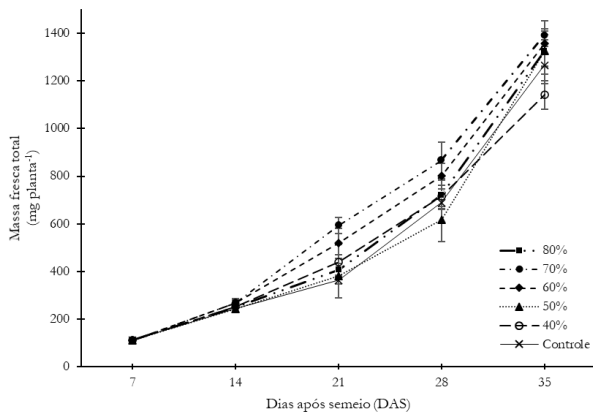
(b)



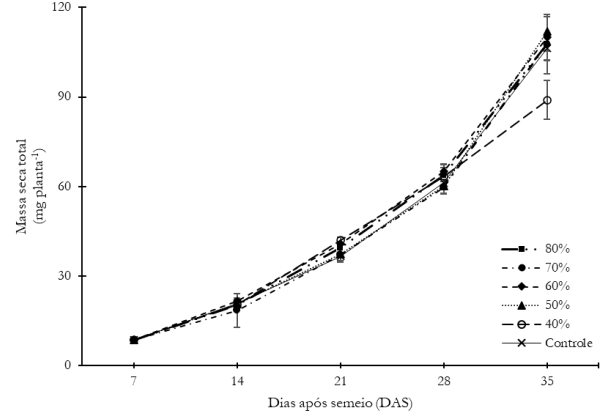
(c)



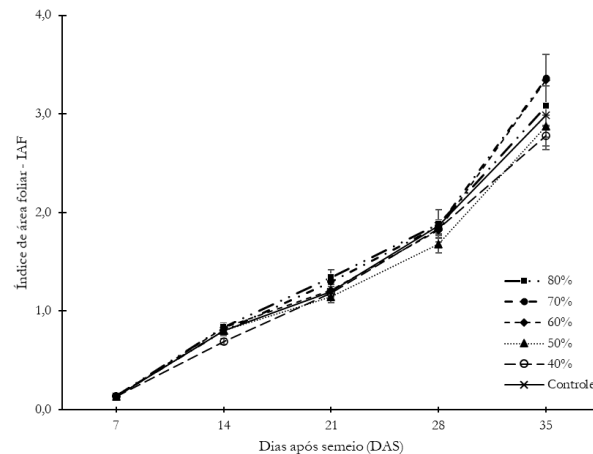
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 16. Massa fresca (a, c, e) e seca (b, d, f) da parte aérea, da raiz e índice de área foliar (g) no segundo cultivo de alface.

A umidade do substrato é uma característica crítica para o crescimento e um dos fatores mais difíceis de manter em níveis ótimos para as plantas. Isto é, entre os limites de déficit e excesso de água, onde a água está corretamente disponível. A presença da água na etapa de formação das mudas é imprescindível; porém períodos longos de déficit hídrico no substrato são prejudiciais para as plântulas e as podem afetar irreversivelmente impedindo o posterior desenvolvimento vegetativo, ou acelerar o florescimento e assim a senescência no período produtivo (Gonçalves, 1994; Borowski & Nurzyński, 2012). O excesso da água reduz o arejamento do substrato, o que pode causar a inibição da germinação pelo aumento da demanda de oxigênio (Minami, 2010). Dessa maneira, é considerado importante que durante a fase de germinação, não seja fornecida água em quantidade excessiva. Diversos autores indicam que o umedecimento do substrato até um 50% da umidade é ideal para essa fase, enquanto para a formação da plântula é necessária uma maior quantidade de água sem sobrepassar a capacidade do recipiente (Nascimento et al., 2011).

3.2.2 Variáveis analisadas no momento do transplante.

3.2.2.1 Crescimento das mudas

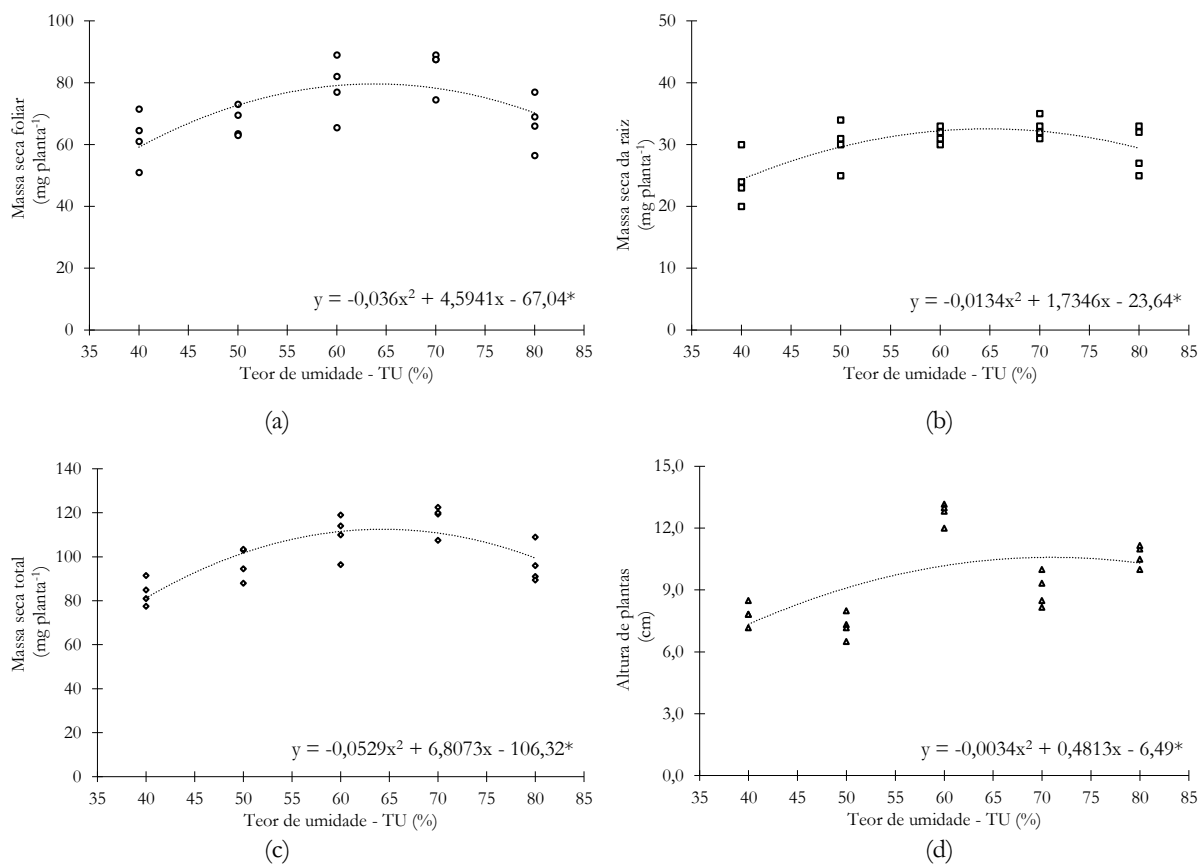
A análise multivariada destacou três grupos de tratamentos para ambos os cultivos de de alface. Foram de maior desempenho os tratamentos com 60 e 70 % de umidade, seguidos do grupo controle, com percentagens entre 50 e 80 % e com menores valores de crescimento o tratamento isolado de 40 % de umidade. Neste tratamento, a massa seca total, a área foliar e a altura das plantas foram 27, 21 e 18 % menores no primeiro cultivo e 19, 17 e 33 % menores no segundo cultivo, respectivamente, que as evidenciadas nos tratamentos de 70 e 60 % de umidade (Tabela 3).

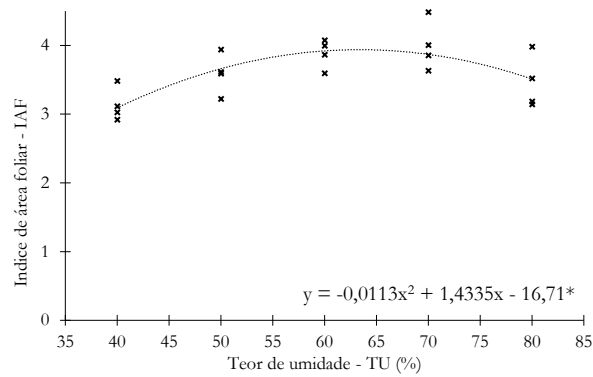
Tabela 3. Massa fresca, massa seca (mg planta⁻¹), área foliar (cm²) e altura (cm) por plântula de alface no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em porcentagem do teor de umidade – TU e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Alface cv. Vanda									
Primeiro cultivo									
Tratamentos em TU (%) *	Massa fresca	Massa seca	Massa fresca	Massa seca	Massa fresca	Massa seca	Área foliar	Altura	Grupos
	foliar	foliar	de raiz	de raiz	total	total			
-----mg planta ⁻¹ -----							cm ²	cm	
70, 60	876	82	358	32	1233	114	29	11	A
80, 50, Controle	818	70	330	29	1148	99	26	9	B
40	706	62	253	24	958	84	23	8	C
CV (%)	11	10	13	10	9,6	7,7	8,2	6,6	
Segundo cultivo									
70, 60	933	69	442	40	1374	109	24	12	A
80, 50, Controle	850	67	456	42	1306	109	22	10	B
40	774	58	367	32	1141	89	20	8	C
CV (%)	7	8,3	7,8	7,3	5	6,1	7,7	6,9	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

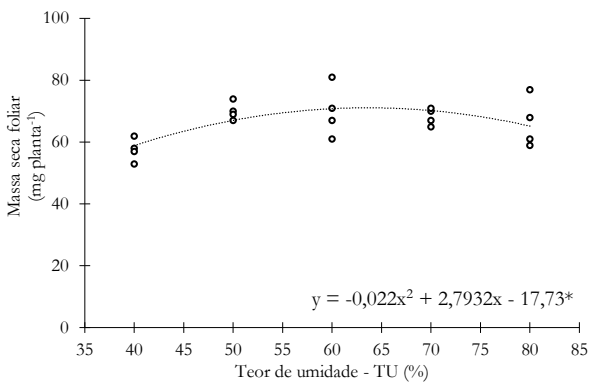
Para ambos ciclos de alface, os modelos ajustados significativos das variáveis de crescimento analisadas, foram do tipo quadrático, caracterizados por atingir os valores máximos de massa seca, altura de plantas e índice de área foliar entre 60 e 70% de umidade (Figuras 17 e 18).



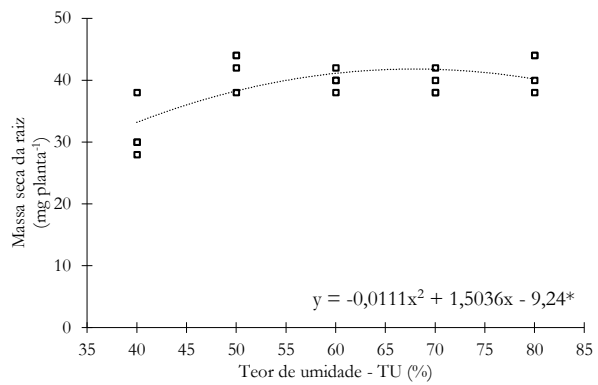


(e)

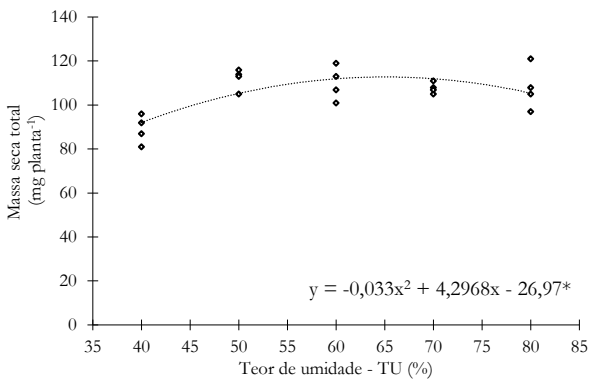
Figura 17. Modelos quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*) de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de alface prontas para o transplante no primeiro cultivo.



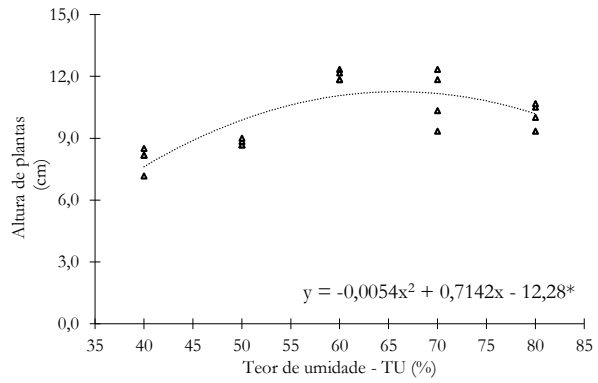
(a)



(b)



(c)



(d)

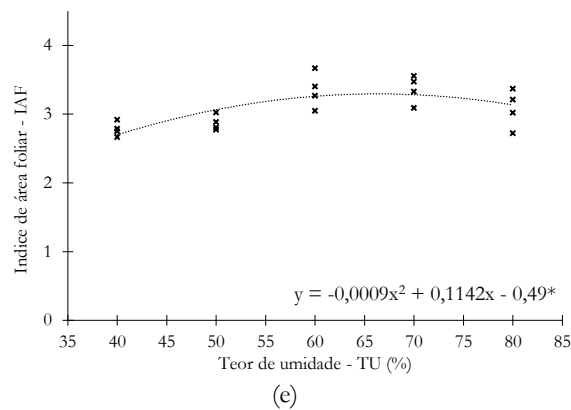


Figura 18. Modelos quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*) de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de alface prontas para o transplante no segundo cultivo.

Pantano et al. (2015), avaliaram o desempenho de diferentes cultivares de alface, e evidenciaram valores de massa fresca de raiz (300 e 340 mg planta⁻¹) semelhantes aos observados neste trabalho no primeiro dia após o transplante. Sousa et al. (2015) avaliou a produção de mudas de alface em diferentes tamanhos de recipientes, em bandejas de polietileno de 200 células e obtiveram mudas com massa seca da parte aérea e da raiz de 100 e 80 mg planta⁻¹ respectivamente. Embora, os valores são próximos aos apresentados na Tabela 3, os autores citados anteriormente avaliaram cultivares diferentes aos utilizados nessa pesquisa.

Diversos estudos mostraram a redução do crescimento das plantas quando são submetidas a eventos de estresse hídrico, na mesma maneira que nesse trabalho. Engelbrecht e Kursar (2003), Balaguera et al (2008) e Luna et al (2012) evidenciaram uma diminuição na AF em mudas de *Cordia alliodora*, *Pterocarpus robrüi*, *Leucaena leucocephala*, *Piscidia piscipula* e *Solanum lycopersicum* nos tratamentos expostos à seca. Luna et al. (2012) indicaram que o crescimento foliar é um dos primeiros processos fisiológicos afetados pela diminuição da disponibilidade de água, já que esse é um mecanismo das plantas para reduzir a superfície evaporativa, e assim evitar a perda de água pelos eventos de estresse hídrico. Da mesma forma, a redução da AF indica a capacidade das plantas de tolerar e se aclimatar ao estresse hídrico ocasionado, por meio de respostas morfogênicas específicas (Khurana e Singh, 2004).

Como foi indicado anteriormente, tanto o déficit hídrico quanto o excesso de água, são condições desfavoráveis ao crescimento das mudas, o que pode ser observado nos modelos descritos acima, nos quais após superar o 70% da umidade se evidencia uma leve queda em algumas das variáveis avaliadas.

Na Figura 19 observa-se o estado de três mudas de alface coletadas de forma aleatorizada, em que as mudas de 50 e 40% de umidade, visualmente apresentaram um menor porte em comparação às outras.

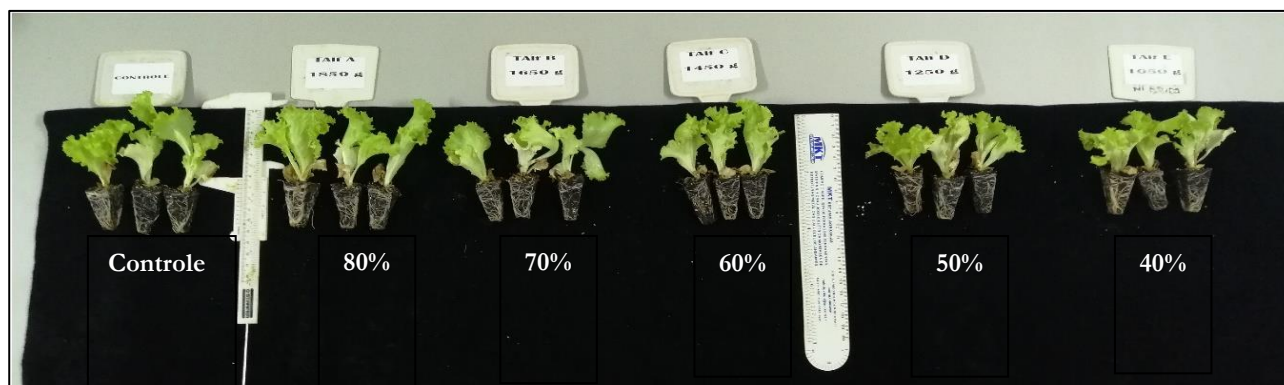


Figura 19. Plantas de alface aos 35 dias após o semeador, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em capacidade de teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

3.2.2.2 Desenvolvimento do sistema radicular

O sistema radicular das mudas produzidas no maior teor de umidade (80%) para ambos os ciclos de alface, foi classificado dentro do grupo de melhor comportamento. As mudas de alface apresentaram um sistema radicular menos robusto quando submetidas ao teor de umidade de 60, 50 e 40 % (Tabela 4). No caso do controle, no primeiro ciclo houve menores valores em comparação com o tratamento de 80% de umidade, no entanto, no segundo ciclo, foi classificado dentro do grupo de maior desempenho, junto com 80 e 70% de umidade.

Tabela 4. Longitude (cm), área projetada (cm²), área superficial (cm²), diâmetro médio (mm), volume (cm³), número de pontas, altitude de mudas de alface no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Alface cv. Vanda								
Primeiro cultivo								
Tratamentos em TU (%) *	Comprimento total	Área Projetada	Área Superficial	Diâmetro médio	Volume	No. pontas	Altitude	Grupos
	cm	cm ²	cm ²	mm	cm ³			
80	317	12,0	37,6	0,38	0,36	413	54,6	A
70, 60, 50, 40, Controle	237	9,3	29,2	0,40	0,29	336	50,5	B
CV (%)	17	14	14	9,3	16,4	24	12	
Segundo cultivo								
80, 70, Controle	355	15,1	47,5	0,43	0,51	506	57,7	A
60, 50, 40	272	12,1	38,2	0,45	0,43	445	52,7	B
CV (%)	24	20	20	9,2	20	25	15	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo *hotelling teste* com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Na Tabela 3 e nas Figuras 17b e 18b pode ser verificado como a massa seca da raiz foi reduzida no tratamento de 40% de umidade; do mesmo modo, na Tabela 4, este tratamento foi classificado no pior grupo para ambos os ciclos de cultivo. Consequentemente, o sistema radicular se mostrou afetado pelo déficit hídrico, pois o diâmetro médio foi levemente superior evidenciando diferenças morfogênicas no sistema radicular para os tratamentos de déficit hídrico; isto provavelmente como meio de adaptação às condições de estresse hídrico (Khurana e Singh,

2004). Existem consequências negativas para a plântula quando a mesma é exposta a esse tipo de estresse, que finalmente afeta a morfologia das raízes, pois cabe ressaltar a redução da taxa de divisão celular, alteração da síntese de sinais químicos que induzem o fechamento e a abertura estomática, assim se tem alteração da troca gasosa e a assimilação dos carboidratos, esses fenômenos finalmente interferem na estrutura e funcionamento adequado do sistema radicular (Latimer & Severson, 1997; Engelbrecht & Kursar, 2003; Balaguera et al., 2008). Por conseguinte, o sistema radicular foi limitado pelo déficit hídrico quando a umidade se manteve em torno de 40%.

3.2.2.3 Medidas da fotossíntese

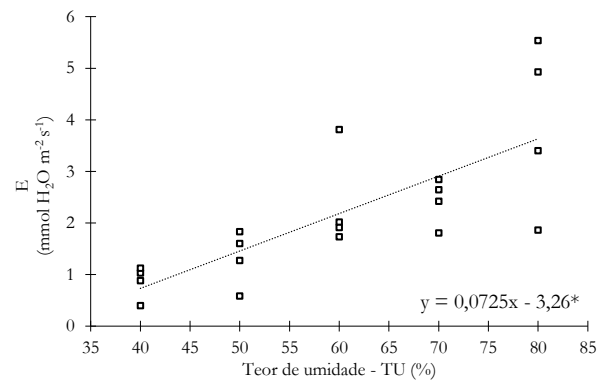
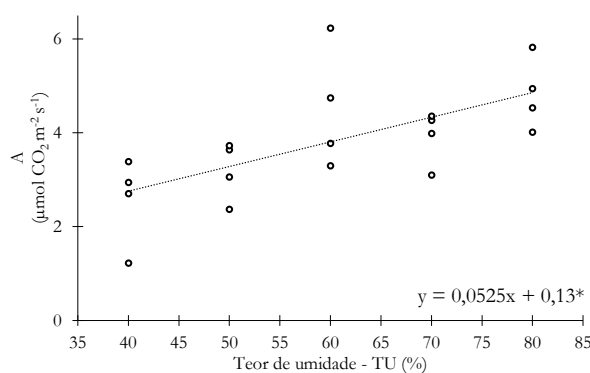
As mudas submetidas a menores teores de umidade (TU de 50 e 40%) mostraram redução na sua atividade fisiológica, com taxa fotossintética de 65,6%, transpiração de 38,4%, condutância estomática de 33,6% e índice de concentração de CO₂ de 78,6% frente aos demais tratamentos. O índice intrínseco de eficiência de uso da água foi o dobro no grupo de 50 e 40% do TU (Tabela 5).

Tabela 5. *A*: taxa de fotossínteses líquida, *E*: transpiração, *g_s*: condutância estomática, *χC*: concentração intracelular de CO₂ e *ΔWUE*: índice intrínseco de eficiência de uso da água em mudas de alface no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Tratamentos em TU (%) *	Mudas de Alface cv. Vanda					Grupos
	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>g_s</i>	<i>χC</i>	<i>ΔWUE</i> (relação <i>A/g_s</i>)	
	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	mmol m ⁻² s ⁻¹	μmol CO ₂ mol ⁻¹	μmol CO ₂ mol ⁻¹ H ₂ O	
80, 70, 60, Controle	4,39	2,84	113	309	0,433	A
50, 40	2,88	1,09	38	243	0,859	B
CV (%)	24	36	43	9	27	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Os modelos de regressão ajustados nas variáveis fisiológicas foram de tipo linear, Foi observada maior atividade fisiológica na medida que foi incrementado o TU (Figura 20a – 20d), e no caso do índice intrínseco de eficiência de uso da água aconteceu o contrário (Figura 16e).



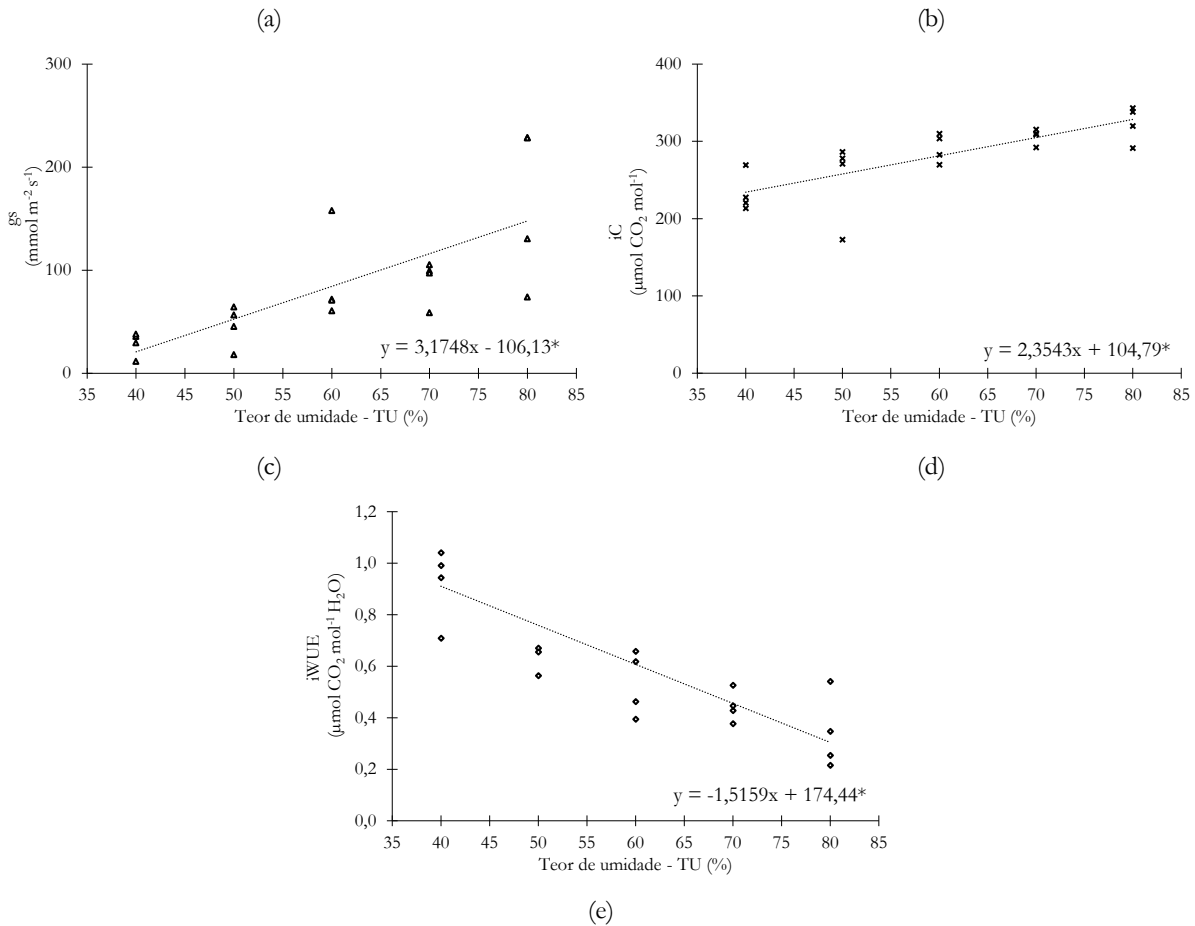


Figura 20. Modelos lineares significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*) de parâmetros fisiológicos em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de alface prontas para o transplante.

É uma realidade que a atividade fisiológica se vê limitada pela carência de água no meio de crescimento, pois o déficit hídrico interrompe todas as reações bioquímicas nas plantas (Marouelli et al., 2011). Robayo et al., (2017) evidenciaram valores médios menores de $50 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na condutância estomática em plântulas de alface no momento de transplante, devido a problemas de estabilização do pH da solução no primeiro ciclo de cultivo. Da mesma forma, os valores encontrados em plantas submetidas a menor umidade no substrato neste trabalho, foram próximos aos encontrados pelos autores supracitados (Figura 5). No segundo ciclo de cultivo, Robayo et al., (2017) no momento do transplante, encontraram valores médios de condutância estomática superiores a $120 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ou seja, semelhantes aos encontrados nesta pesquisa para os tratamentos de maior umidade no substrato (Figura 5). Também observaram que as plantas se encontravam em ótimas condições fisiológicas, em ausência de qualquer tipo de estresse, e argumentam que, segundo Kim et al. (2004), para plântulas de alface, a condutância estomática é baixa, pois varia de 50 a $130 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ devido a qualidade espectral da luz durante o crescimento, o que está relacionado com uma menor acumulação de massa seca nesta fase de mudas em comparação à fase de produção em campo aberto. Cabe ressaltar a baixa radiação dentro da estufa (Figuras 5c e 10c) durante a realização dos experimentos, o que concorda com o citado anteriormente.

Em condições de ótima umidade do substrato e do ambiente, as taxas fotossintéticas são sempre determinadas pela intensidade luminosa e a temperatura do ar. Em condições de estresse hídrico, a taxa fotossintética

é reduzida drasticamente, e pode demorar dias para retornar ao seu nível normal logo após de ser reestabelecida a umidade pela irrigação (Minami, 2010). Isto concorda com os resultados apresentados na Tabela 5 e na Figura 20a, segundo os quais os tratamentos com menor umidade do substrato mostraram uma redução significativa da taxa fotossintética em comparação com os demais tratamentos, pelo que se observa represado o crescimento das plântulas, e muito provavelmente o desenvolvimento posterior das mudas.

3.2.2.4 Análise de imagens multiespectrais

As mudas que se mantiveram com 40 % do TU durante o crescimento, no final do ciclo evidenciaram menores valores de fluorescência, eficiência do fotossistema II, refletância e índices de antocianinas e clorofilas, que mudas mantidas com maior TU e em relação ao controle (Tabela 6).

Tabela 6. F0: fluorescência mínima, Fm: fluorescência máxima, Fv/Fm: eficiência quantifica máxima do fotossistema II, Red: refletância no vermelho, Green: refletância no verde, Blue: refletância no azul, ChlIdx: índice de clorofila A, AriIdx: índice de antocianinas, Chl₇₁₀: fluorescência de clorofilas a 710 nm de mudas de alface no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Alface cv. Vanda										
Tratamentos em TU (%) *	F0	Fm	Fv/Fm	Red	Green	Blue	ChlIdx	AriIdx	Chl ₇₁₀	Grupos
80, 70, 60, 50, Controle	3444	12683	0,73	5130	7744	1699	1,72	2,11	27164	A
40	2906	11259	0,74	4885	7226	1658	1,63	2,00	25162	B
CV (%)	7,6	5,4	2	5	3,9	8,1	6,2	9,1	5,3	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Ribeiro (2003), avaliando o efeito do estresse por clorose variegada em mudas de laranjeira, evidenciou valores superiores de Fv/Fm em plantas infetadas pela doença, indicando dano no sistema fotossintético por causa da doença. Neste trabalho o índice Fv/Fm mostrou valores próximos para todos os tratamentos, provavelmente devido ao fato de que o estresse hídrico no tratamento de 40% de umidade não causou danos permanentes no sistema fotossintético, pois se deu em pequenos períodos de tempo, permitindo as plântulas sua recuperação logo após a seguinte irrigação; porém, houve claras restrições fisiológicas e morfológicas como foi evidenciado nos resultados anteriormente descritos.

3.2.2.5 Teor de clorofila e carotenoides

As mudas expostas a 40 % de umidade se apresentaram maior concentração de clorofila total. Porém, para o primeiro ciclo, a concentração de carotenoides foi menor nesse tratamento. No caso do segundo ciclo, o tratamento com 40% de umidade teve mudas com a maior concentração de clorofila total, assim como o 80 e 50 %; as mudas submetidas a 70% de umidade mostraram os valores mais baixos em todos os pigmentos (Tabela 7).

Tabela 7. Teores de clorofila A clorofila B, clorofila total e carotenoides (mg g^{-1}) de mudas de alface no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Alface cv. Vanda					
Primeiro cultivo					
Tratamentos em TU (%) *	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila total	Carotenoides	Grupos
	mg g^{-1} de massa fresca				
40	0,483	0,056	0,539	0,085	A
80, 70, 60, 50, Controle	0,297	0,059	0,356	0,126	B
CV (%)	11	17	12	13	
Segundo cultivo					
80, 50, 40	0,283	0,084	0,367	0,091	A
60, Controle	0,226	0,063	0,289	0,072	B
70	0,130	0,046	0,176	0,047	C
CV (%)	21	19	18	11	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo *hotelling* teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Resultados semelhantes nos teores de clorofila foram relatados por Bezerra et al., (2019) ao avaliar a produção de mudas de alface sobre diferentes tensões no substrato. Embora esses autores não tenham evidenciado diferenças no teor de clorofila A, os níveis de clorofila B foram maiores nas plântulas submetidas a tensões mais elevadas, pois esses tratamentos levaram à produção de plântulas de menor área foliar, o que interferiu na concentração destes pigmentos. Da mesma maneira Rahimi et al. (2013) indicam que pode ser incrementado o teor de clorofila em plantas submetidas a estresse hídrico.

Tabela 8. Correlação entre os componentes principais e as variáveis estudadas no cultivo de alface.

Variáveis	Primeiro ciclo		Segundo ciclo	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Área foliar (AF)	-0,54	0,54	0,65	0,46
Massa seca da parte aérea (PSPA)	-0,50	0,69	0,73	0,25
Massa seca da raiz (PSR)	-0,58	0,34	0,4	0,46
Massa seca total (PSt)	-0,64	0,67	0,69	0,39
Altura de plantas (Alt)	-0,65	-0,06	0,37	0,71
Clorofila A (ChrA)	0,51	-0,13	-0,3	-0,37
Clorofila B (ChrB)	-0,17	0,36	-0,4	-0,63
Carotenoides (Carot)	-0,60	0,38	-0,56	-0,32
Longitude de raiz (Length)	-0,90	-0,28	-0,36	0,88
Area projetada de raiz (ProjArea)	-0,73	-0,63	-0,31	0,88
Area Superficial de raiz (SurfArea)	-0,73	-0,63	-0,31	0,88
Diâmetro médio de raiz (AvgDiam)	0,76	-0,31	0,38	-0,58
Volume de raiz (RootVolume)	-0,14	-0,84	-0,2	0,79
Quantidade de pontas (Tips)	-0,75	-0,39	-0,35	0,62
Altitude	-0,35	-0,62	-0,35	0,79
Taxa de fotossíntese neta (Fotosint)	-	-	0,11	0,55
Condutância estomática (Conditiv)	-	-	-0,13	0,68
Índice intrínseco de eficiência de uso da água (iWUE)	-	-	-0,08	-0,82
Transpiração (Transp)	-	-	-0,09	0,74
Eigenvalue	5,49	3,82	3,1	8,1
Variância Total (%)	25,5	36,6	16,4	41,6

Para o primeiro ciclo de alface, a análise de componentes principais (PCA) das variáveis (AF, PSPA, PSR, PSt, Alt, ChrA, ChrB, Carot, Length, ProjArea, SurfArea, AvgDiam, RootVolume, Tips e Altitude) obtidas a partir dos 6 tratamentos utilizados no estudo explicou 62,15% (36,64% para componente principal 1 - PC1 e 25,51% para componente principal 2 - PC2) da variância contida no conjunto original dos dados (Tabela 8). Dentre as variáveis o (AF, PSPA, PSR, PSt, Alt, ChrA, Carot, Length, ProjArea, SurfArea, AvgDiam, Tips) foram relevantes para CP1, com coeficiente de correlação acima de 0,5. O PC1 explicou 25,5% (eigenvalue igual a 5,49) da variância, sendo que as variáveis com maior poder discriminatório neste componente foram: AF (-0,54), PSPA (-0,5), PSR (-0,58), PSt (-0,64), Alt (-0,65), ChrA (0,51), Carot (-0,6), Length (-0,9), ProjArea (-0,73), SurfArea (-0,73), AvgDiam (0,76) e Tips (-0,75). O PC2 explicou 36,6% (Eigenvalue igual a 3,82) da variância, sendo o AF (0,54), PSPA (0,69), PSt (0,67), ProjArea (-0,63), SurfArea (-0,63), RootVolume (-0,84) e Altitude (-0,62) as variáveis que tiveram maior poder discriminante atuando de forma direta.

Para o segundo ciclo de alface, a PCA de todas as variáveis contidas na Tabela 8, e determinadas a partir dos 6 tratamentos aplicados, explicou 58 % (16,4 % para PC1 e para PC2 41,6 %) da variância contida no conjunto de dados. O PC1 explicou 16,4 % (eigenvalue igual a 3,1) da variância, assim as variáveis AF (0,65), PSPA (0,73), PSt (0,69) e Carot (0,56) foram relevantes para este componente. O PC2 explicou 41,6% (eigenvalue igual a 8,1) da variância, as variáveis que evidenciaram maior poder discriminante foram: Alt (0,71), ChrB (-0,63), Length (0,88), ProjArea (0,88), SurfArea (0,88), AvgDiam (0,58), RootVolume (0,79), Tips (0,62), Altitude (0,79), Fotosint (0,55), Conduktiv (0,68), iWUE (-0,82) e Transp (0,74). No PCA as variáveis com sinais iguais interagem diretamente, ou seja, com o aumento no valor de uma, há aumento no valor de outra, ou vice-versa, enquanto as variáveis com sinal contrário interagem inversamente, isto é, enquanto uma aumenta o valor da outra diminui (Pinto et al., 2021). Dessa maneira se observa como no primeiro ciclo é positivo o valor de diâmetro médio de raiz, sendo negativos as demais características do sistema radicular, e para o segundo ciclo se evidencia o diâmetro médio de raiz negativo acompanhado de valores positivos para as outras características do sistema radicular.

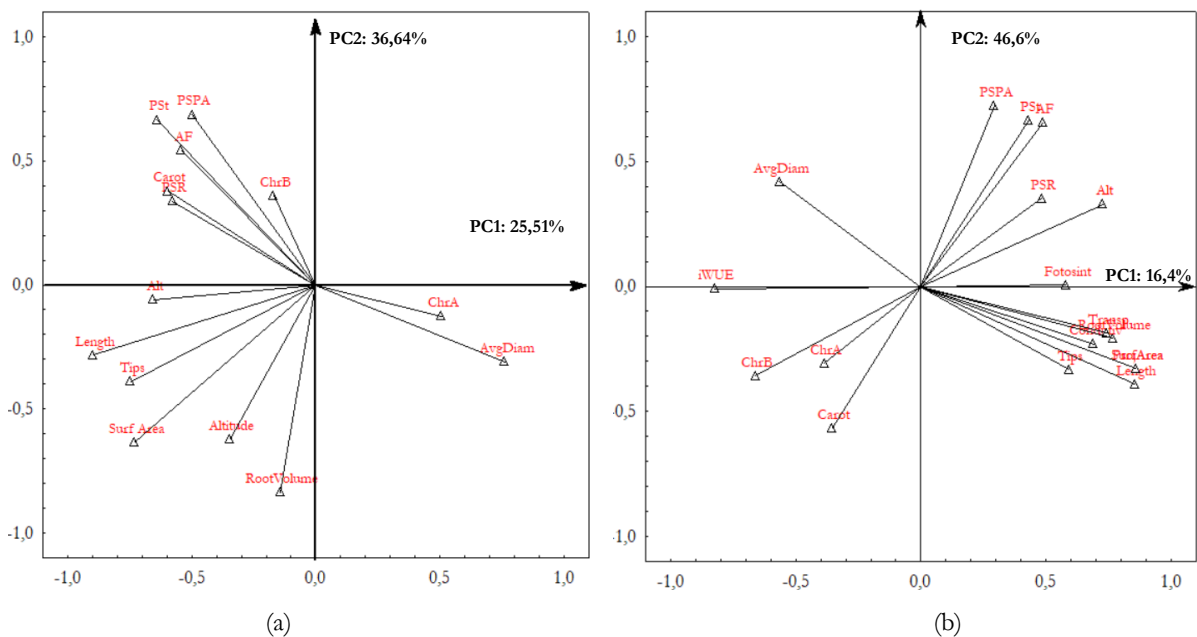
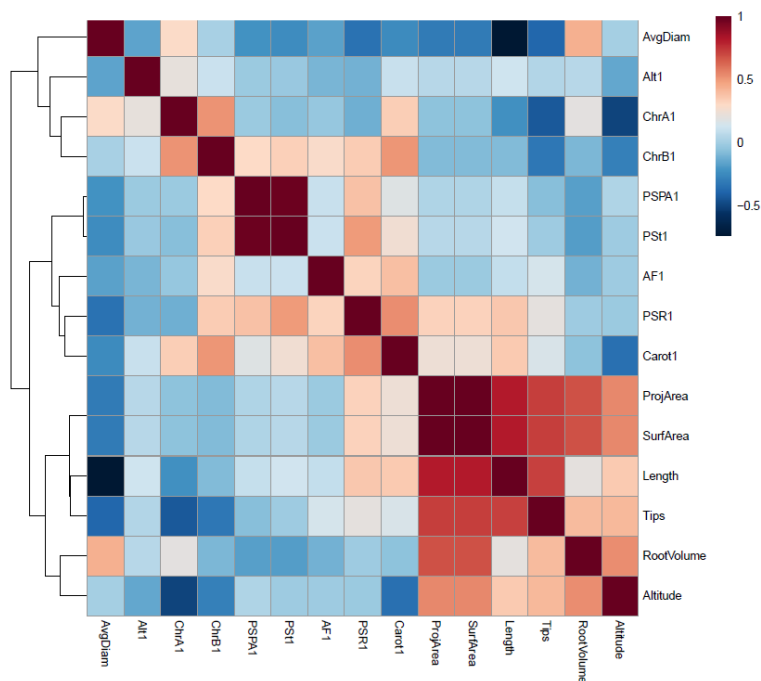


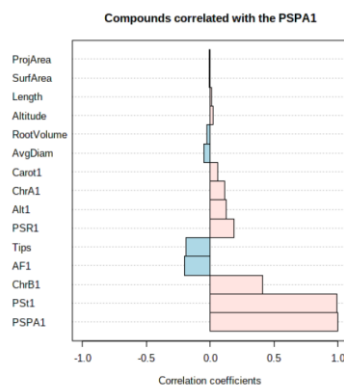
Figura 21. Distribuição das variáveis nos componentes principais no primeiro (a) e segundo (b) cultivo de alface.

Nos gráficos biplot (Figuras 21a e 21b), construídos a partir dos escores das variáveis e as cargas fatoriais do PC1 e PC2, verifica-se a discriminação dos elementos localizados à direita e esquerda (PC1), parte superior e inferior (PC2) (Hair et al., 2005). Segundo Sousa et al. (2018), a influência de um vetor na análise é medida pelo comprimento do mesmo. Assim, para o presente estudo com exceção do ChrB e ChrA para primeiro ciclo (Figura 21a) e para o segundo a ChrA (Figura 21b) todas as variáveis apresentam o tamanho semelhante e consequentemente a mesma influência.

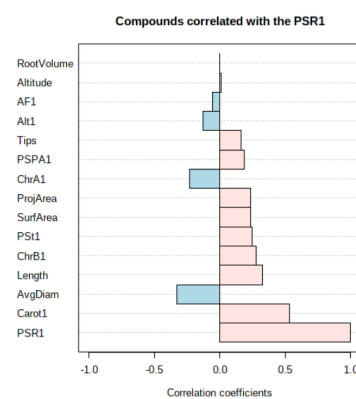
Na matriz de correlação do primeiro ciclo de alface pode ser observado correlações positivas e negativas entre os parâmetros de raiz, se destacando correlações positivas entre comprimento de raiz, área superficial, área projetada, quantidade de pontas. Por outra parte se observa uma forte correlação negativa entre diâmetro médio de raiz e comprimento (Figura 22a) corroborando os resultados dos PCA. Enquanto a componentes do crescimento, a massa seca da parte aérea e da raiz apresentaram coeficientes de correlação positivos e negativos baixos em relação aos outros parâmetros (Figura 22b e 22c).



(a)



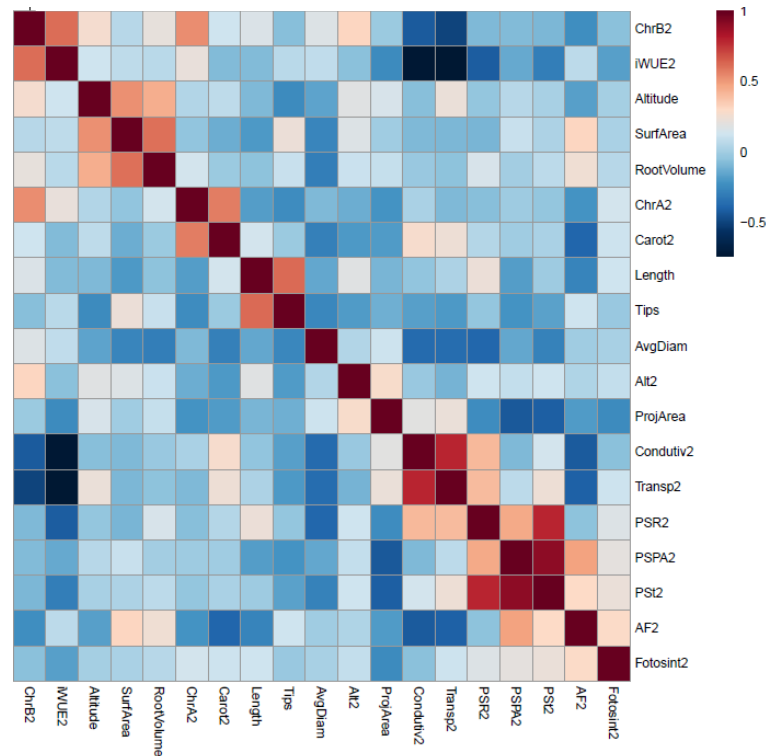
(b)



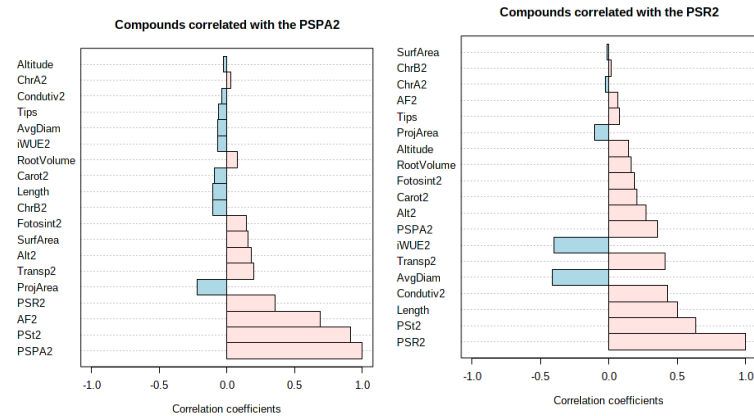
(c)

Figura 22. Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no primeiro cultivo de alface.

Na matriz de correlação para o segundo ciclo de alface, foi evidenciada uma forte correlação negativa entre o índice intrínseco de uso eficiente da água e condutividade estomática e transpiração, corroborando os resultados dos PCA Assim, plantas submetidas a menor umidade do substrato evidenciaram estresse hídrico (Figura 23a). Em relação a massa seca da parte aérea, houve uma correlação positiva com área foliar; no entanto, para os demais parâmetros os coeficientes de correlação foram baixos (Figura 23b). A massa seca da raiz teve coeficientes de correlação próximos a 0,5 com comprimento da raiz, condutividade estomática e transpiração (Figura 23c).



(a)



(b)

(c)

Figura 23. Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no segundo cultivo de alface.

3.2.2.6 Teores de macronutrientes nas folhas

As análises de nutrientes revelaram teores foliares médios entre todos os tratamentos de 21, 5, 42, 8, 4 e 2 g kg⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, pois não foram evidenciadas diferenças significativas. Estes valores são considerados adequados segundo Sanchez et al., (1991).

3.2.3 Eficiência do uso de água

Enfim, em ambos ciclos de cultivo, o tratamento que apresentou menor eficiência de uso da água foi o 40 % de umidade, pois as plantas produziram menos biomassa por volume de água consumido, seguido pelo tratamento de 80 %, e com eficiência semelhante ao controle quando os níveis de umidade estiveram em torno de 70, 60 e 50 % (Figura 24).

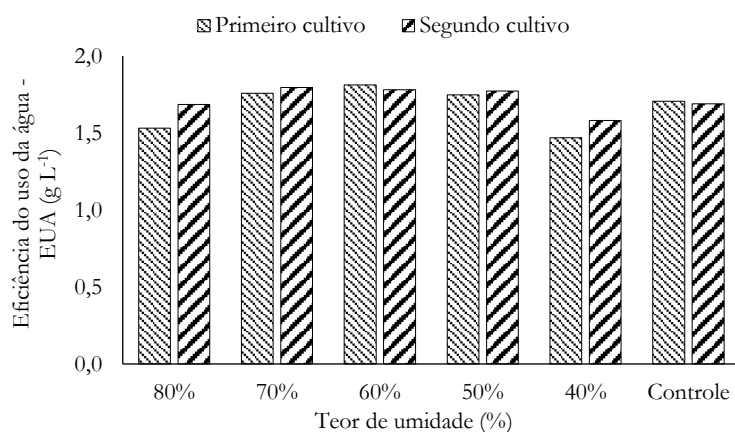


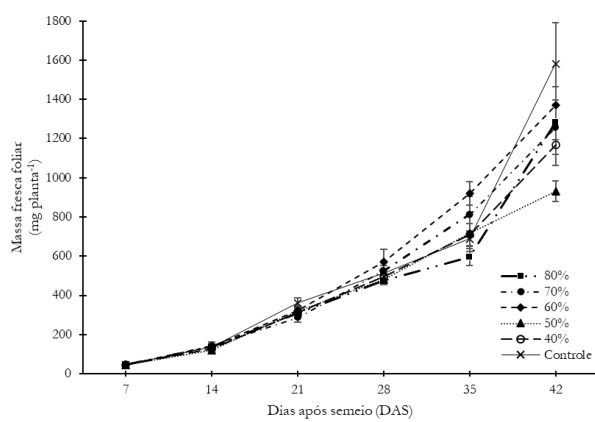
Figura 24. Eficiência do uso da água no primeiro e segundo cultivo de alface.

Bezerra et al. (2019) indicam que existem poucos estudos que avaliaram a aplicação eficiente de água na produção de plântulas de hortaliças. Da mesma maneira como neste trabalho, esses autores calcularam o EUA como a relação entre o valor de massa seca da parte aérea produzida, por volume de água aplicado, para representar este parâmetro em termos agrônômicos. Estes autores encontraram valores de 1,86 g L⁻¹ e 1,37 g L⁻¹ respectivamente, para dois ciclos de alface, os quais concordaram com os determinados neste trabalho para ambos ciclos (Figura 24).

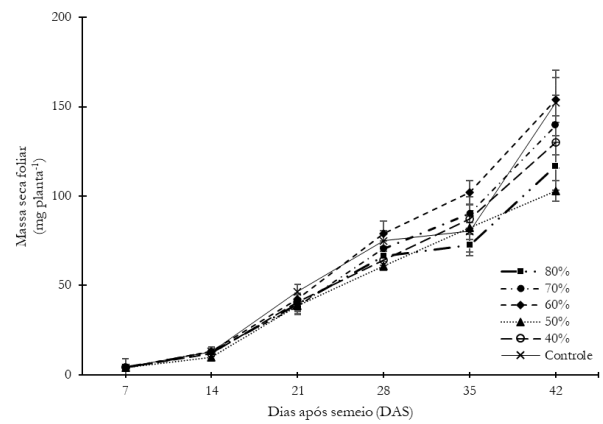
3.3 PRODUÇÃO DE MUDAS DE TOMATE

3.3.1 Variáveis de crescimento analisadas durante o experimento

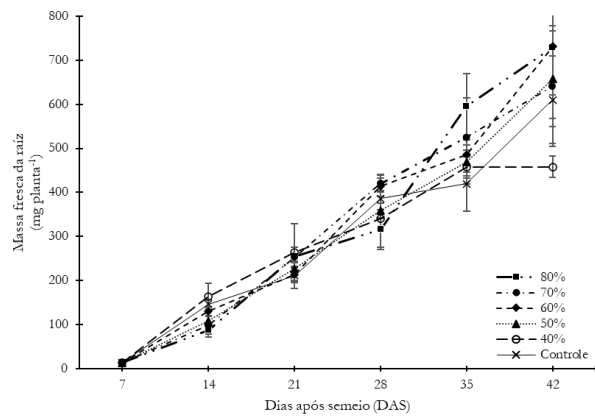
No primeiro cultivo de tomate, aos 6 DAS houve total emergência das plântulas; dessa maneira foram aplicados os tratamentos e feitas as amostragens a partir do 7 DAS e até o final do ciclo (35 DAS). Para o controle, 80, 70, e 60% do TU houve aumento do crescimento e do índice de área foliar até o período de transplante. Na maioria das variáveis os teores de umidade de 50 e 40% apresentaram aumento até 35 DAS, seguida da estabilização da curva. Esses níveis de umidade apresentaram menores valores nos parâmetros de crescimento em comparação ao controle e demais tratamentos. (Figuras 25a – 25i).



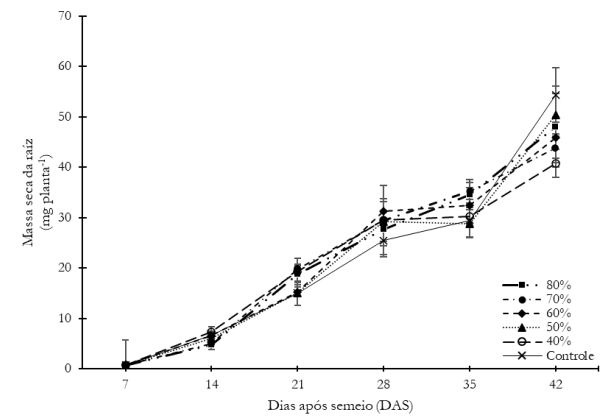
(a)



(b)



(c)



(d)

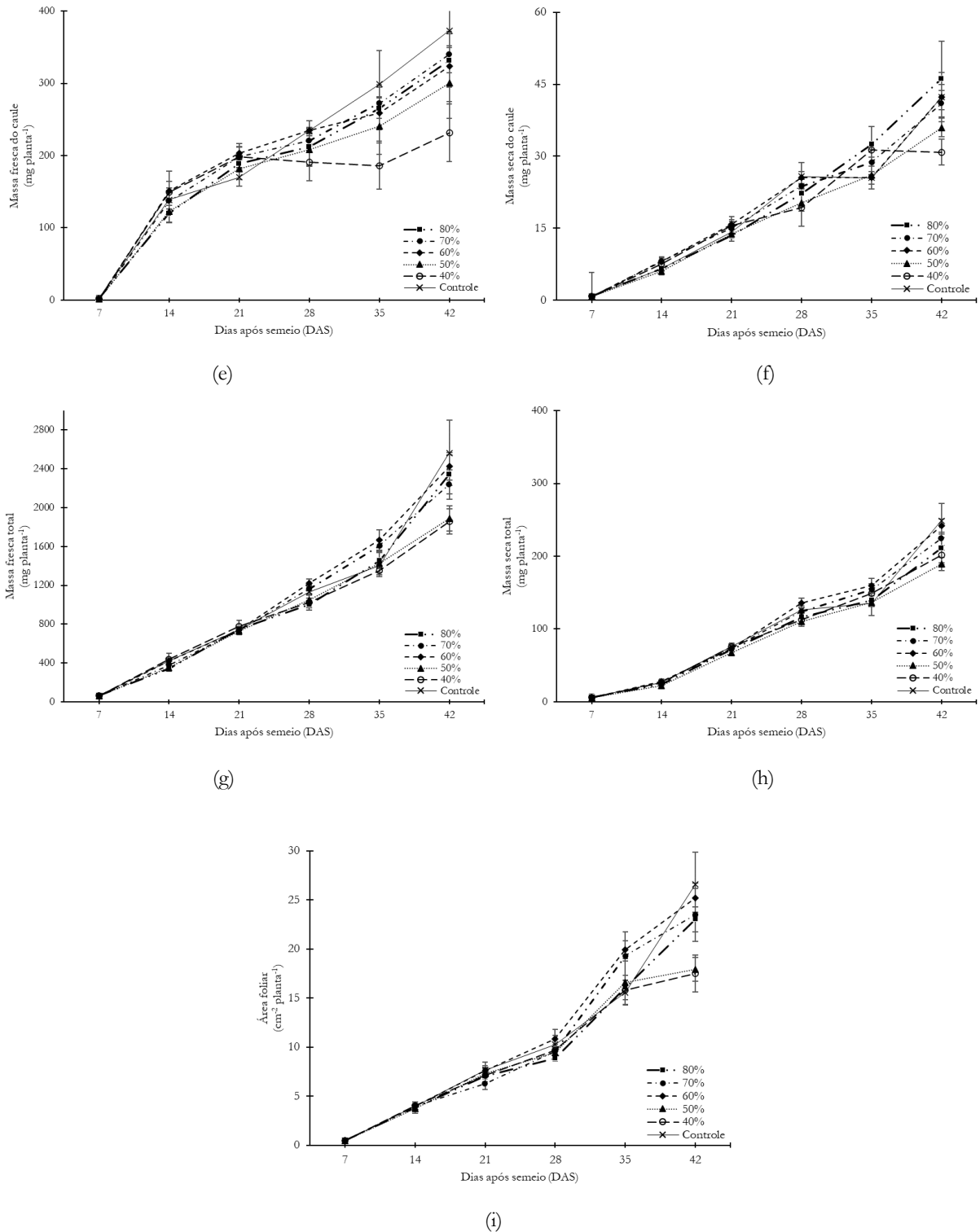
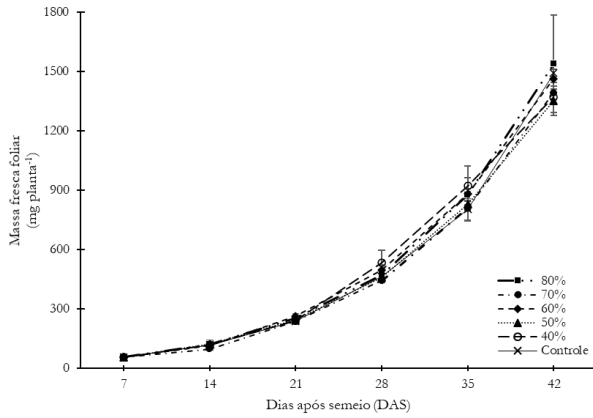


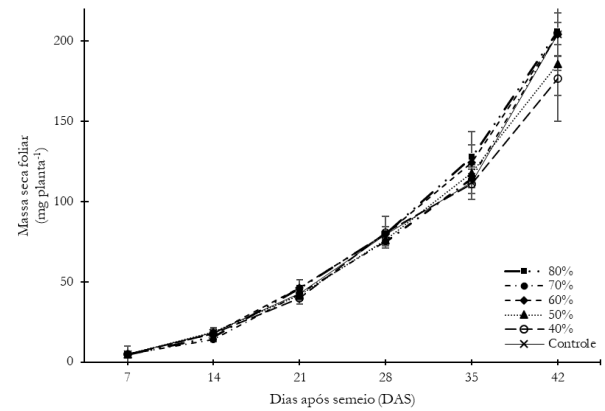
Figura 25. Massa fresca (a, c, e, g) e seca (b, d, f, h) da parte aérea e da raiz, e área foliar (i) no primeiro cultivo de tomate.

Aos 7 DAS houve a total emergência das mudas no segundo cultivo de tomate; a partir desse dia foram aplicados os tratamentos e feita a primeira amostragem, as quais se repetiram cada sete dias até o período de transplante (35 DAS). Para todos os tratamentos houve aumento do crescimento e do índice de área foliar até o período de

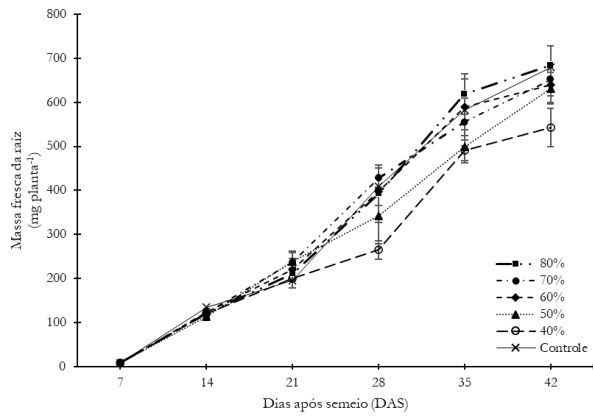
transplante. Observa-se curvas de crescimento próximas entre elas; porém, quando mantida a umidade em 50 e 40%, foram menores os valores de massa fresca e seca em comparação aos demais tratamentos (Figuras 26a – 26i).



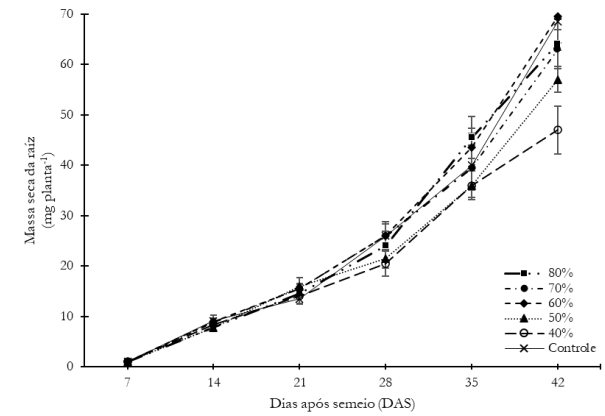
(a)



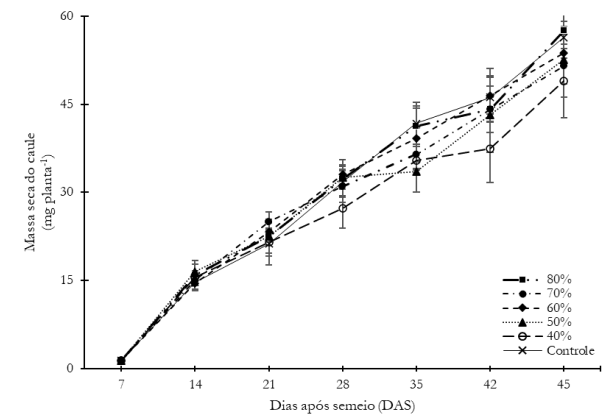
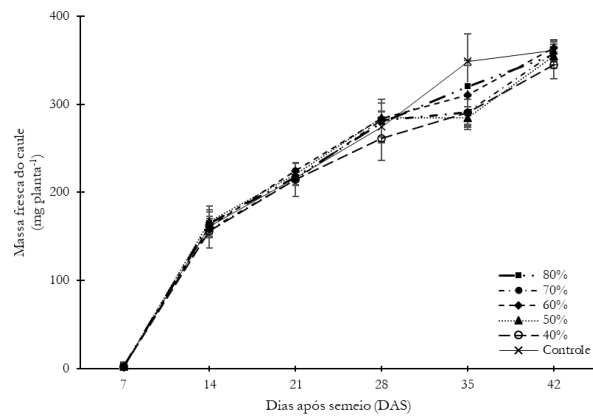
(b)



(c)



(d)



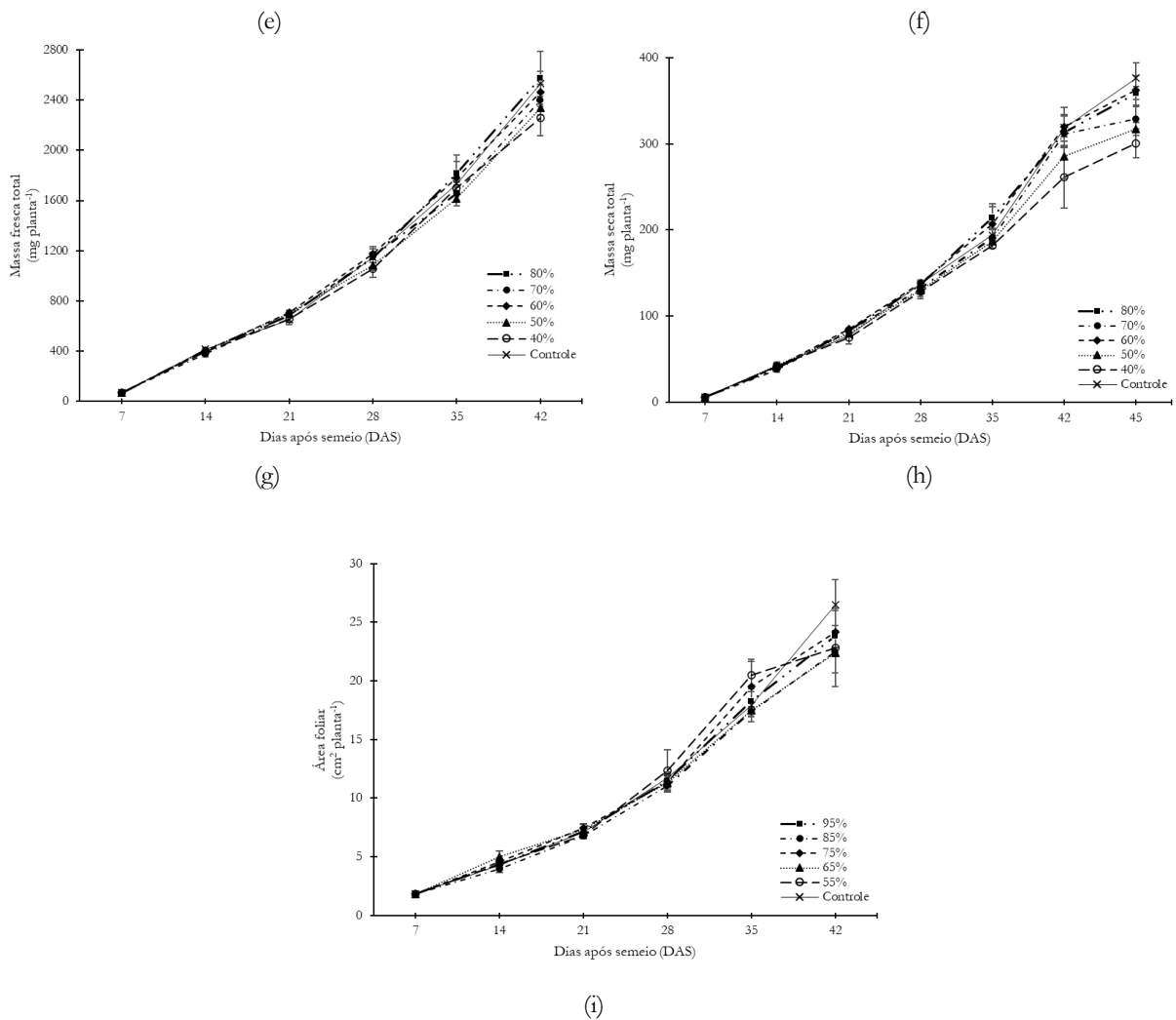


Figura 26. Massa fresca (a, c, e, g) e seca (b, d, f, h) da parte aérea e da raiz, e área foliar (i) no segundo cultivo de tomate.

O controle da umidade no substrato é essencial para manter uma ótima relação ar/água para as raízes, e assim favorecer o crescimento vegetal. Para controlar o crescimento das mudas, e obter plântulas de menor tamanho pode ser utilizada a técnica de condicionamento por estresse hídrico (Latimer e Saverson, 1997); por isso, necessita-se ter conhecimento do limite mínimo da umidade no substrato, para evitar danificá-las. Dessa forma, o monitoramento da umidade deve ser o mais exato possível para evitar danos por déficit hídrico. Mesmo que a experiência dos produtores de mudas seja considerável, é complicado manter o nível de umidade desejado na cultura sem usar nenhum método de monitoramento, porém é difícil a aplicação do condicionamento por estresse hídrico na produção de mudas de hortaliças (Latimer, 1992). Essa técnica que poderia ser implementada de melhor maneira com o uso dos lisímetros de pesagem como os empregados nesta pesquisa. Minami (2010) indica que a redução na quantidade de água, como forma de “endurecer” as mudas, deve ser feita com extremo cuidado, mesmo que esta prática permita maior enraizamento durante o transplante. Ela pode reduzir o reinício do enraizamento, retardando o crescimento, e assim afetando negativamente a qualidade da muda para o transplante. Baseado nos resultados apresentados anteriormente, observa-se que o tratamento de menor nível de umidade mostrou menor crescimento, conforme ao esperado, pois a plântulas

foram submetidas a pequenos momentos de déficit hídrico, os quais foram refletidos no crescimento durante o período experimental.

3.3.2 Variáveis analisadas no momento do transplante

3.3.2.1 Crescimento das mudas

A análise multivariada destacou três grupos de tratamentos no primeiro cultivo e dois no segundo. Foram de menor desempenho os tratamentos de 50 e 40 %, evidenciando que a massa seca total, área foliar, altura e diâmetro do caule foram um 20, 31, 21 e 8 % menores no primeiro cultivo e 14, 4, 25 e 8 % mais baixos no segundo cultivo em comparação com os grupos 80, 70, 60 % e Controle (Tabela 9).

Tabela 9. Biomassa fresca, seca (mg planta^{-1}) de mudas de tomate no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Tomate cv. Santa Cruz Kada												
Primeiro cultivo												
Tratamentos em TU (%) *	Massa fresca da parte aérea	Massa seca da parte aérea	Massa fresca do caule	Massa seca do caule	Massa fresca de raiz	Massa seca de raiz	Massa fresca total	Massa seca total	Área foliar	Altura	Diâmetro do caule	Grupos
	----- mg planta^{-1} -----								cm^2	cm	mm	
60, Controle	1476	153	348	42	50	671	2495	245	26	12,3	2,6	A
80, 70	1270	128	336	44	46	685	2291	218	23	11,1	2,3	B
50, 40	1048	116	266	33	46	558	1872	195	18	9,7	2,4	C
CV (%)	9,8	12	14	11	18	10	8,8	7,3	9,5	7,3	6,2	
Segundo cultivo												
80, 70, 60, Controle	1470	205	360	45	66	663	2493	316	24	12,4	2,4	A
50, 40	1361	181	349	40	52	587	2298	273	23	9,3	2,2	B
CV (%)	8	9,4	3,4	11	7,8	7,5	4,9	7,4	8,3	10,3	6,2	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo *hotelling* teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

As mudas prontas para transplante dos tratamentos de 50 e 40% de umidade apresentaram menor porte em relação ao controle e demais tratamentos (Figura 27).

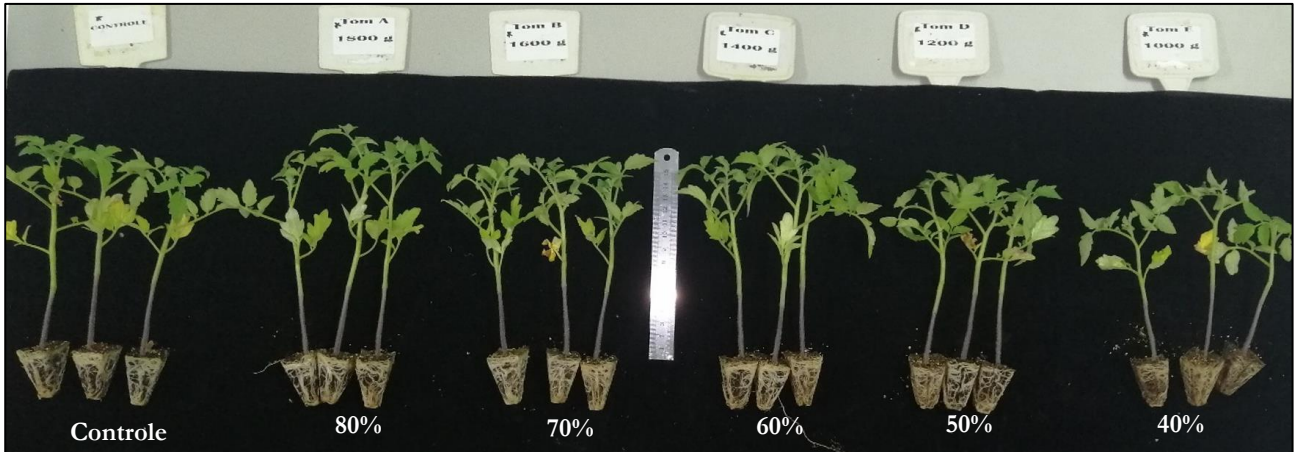
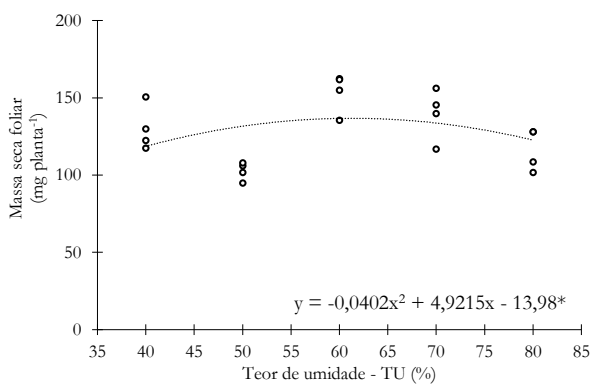
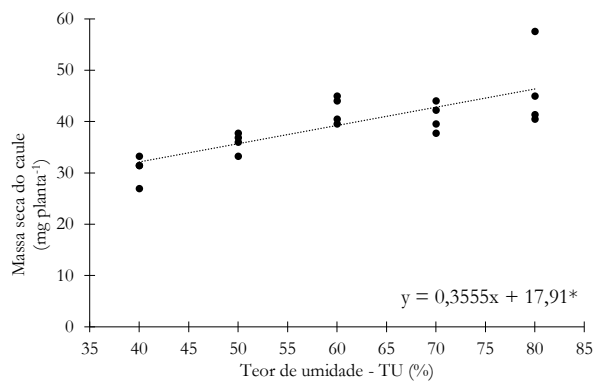


Figura 27. Plântulas de tomate aos 42 dias após o semeador, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

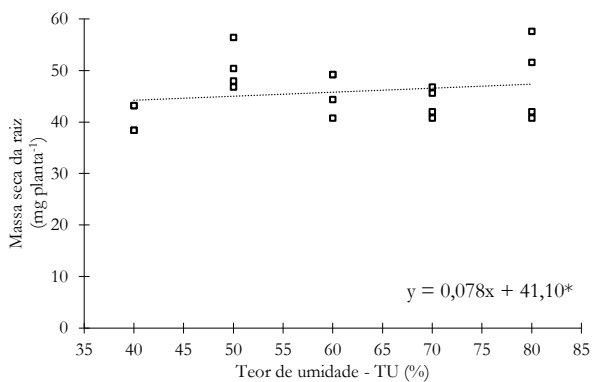
Os modelos de regressão ajustados às variáveis de crescimento para ambos os cultivos de tomate, apresentaram ajustes lineares e quadráticos (Figuras 28 e 29). Assim os modelos quadráticos na sua totalidade tiveram pontos máximos entre 60 e 70 % de umidade. No primeiro cultivo, a massa seca do caule se incrementaria aproximadamente em 3,5 mg planta⁻¹ a cada 10 % de aumento na umidade (Figura 28b) e para massa seca de raiz o modelo linear foi quase constante, com um incremento apenas de 0,78 mg planta⁻¹ a cada 10 % de umidade (Figura 28c).



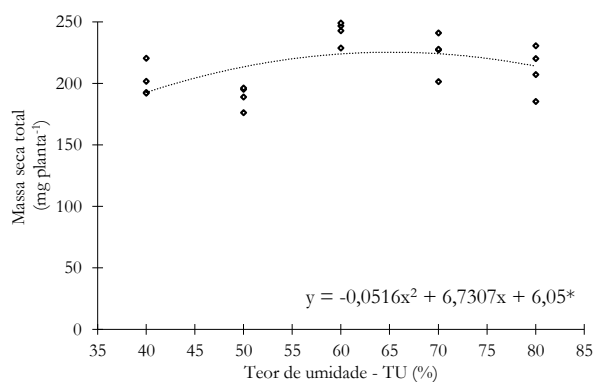
(a)



(b)



(c)



(d)

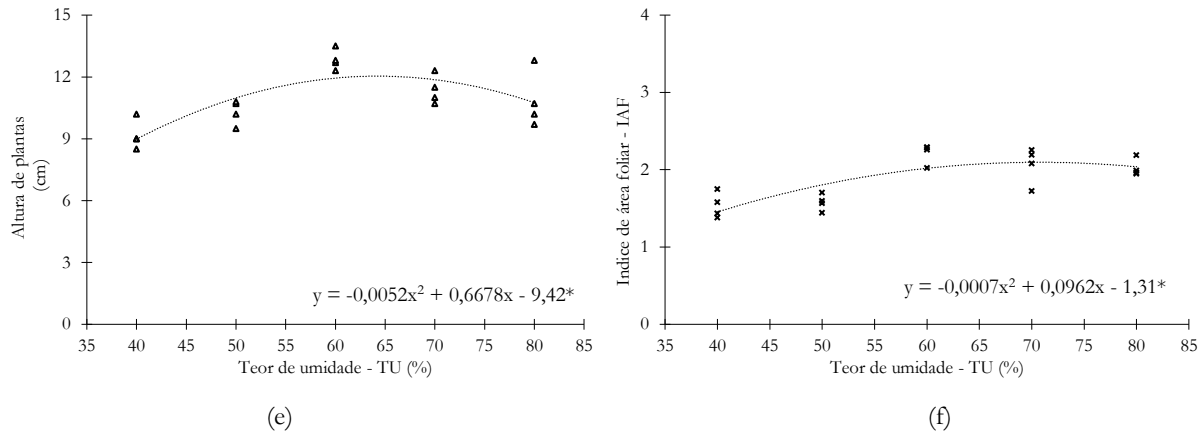
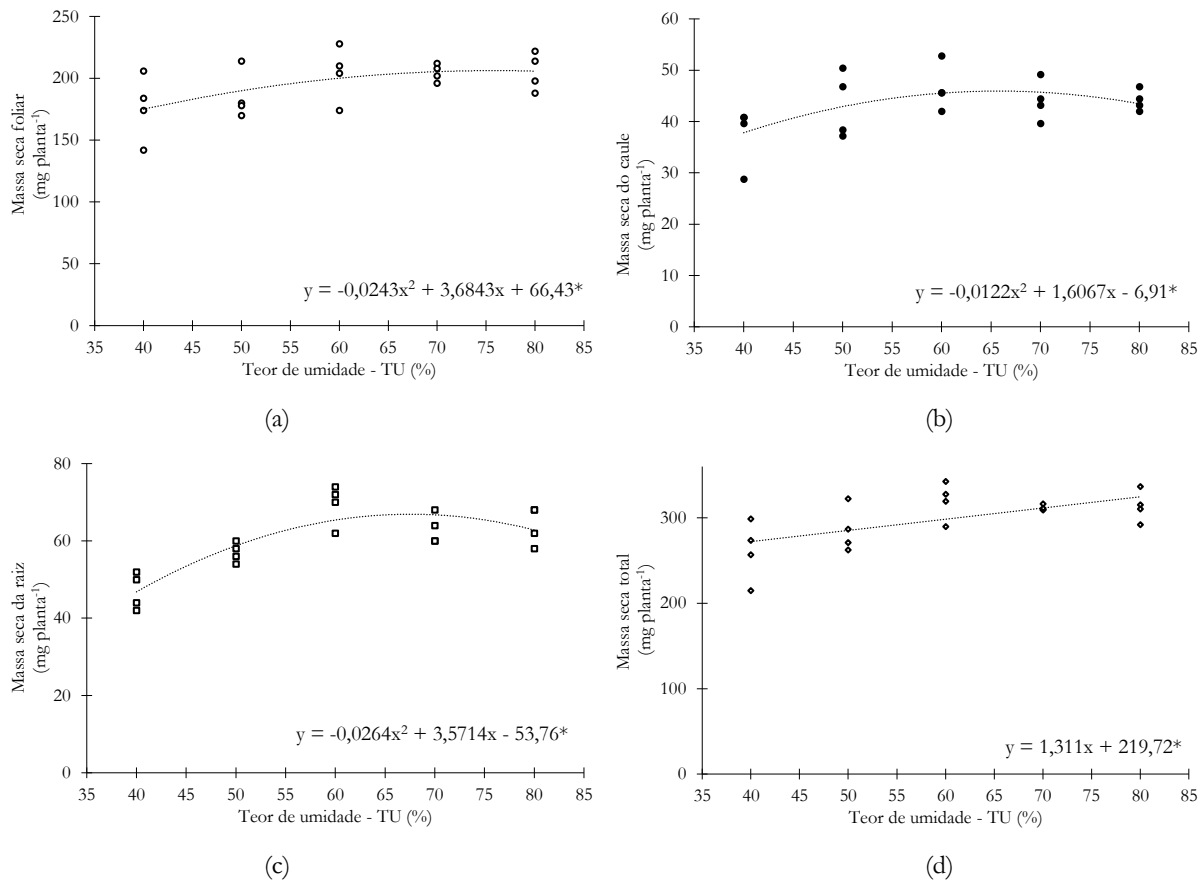


Figura 28. Modelos lineares e quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*), de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no primeiro cultivo.

No segundo cultivo, a massa seca total e altura de plantas apresentaram incrementos de 13 mg planta⁻¹ e 0,94 cm a cada 10 % de aumento de umidade (Figura 29d e 29e) e o IAF se estabilizou após 60 % de umidade (Figura 29f).



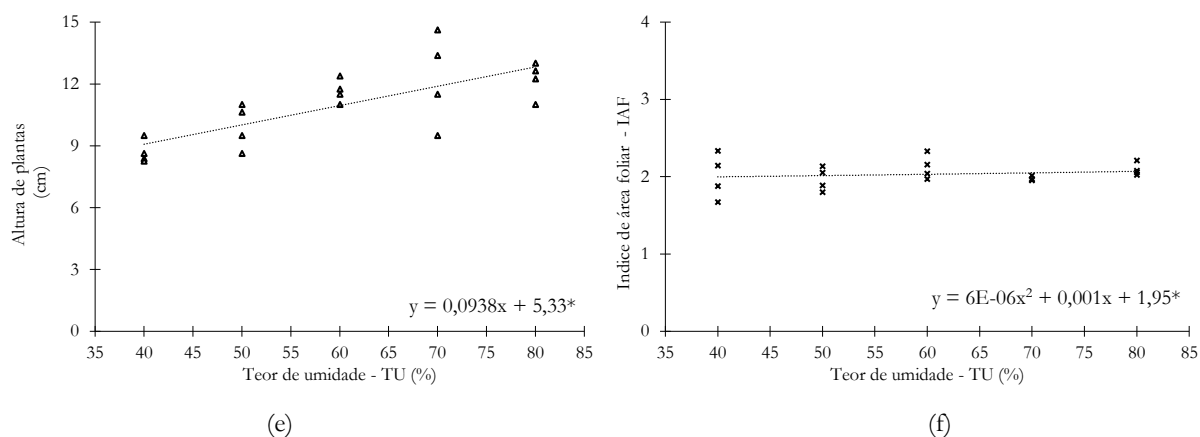


Figura 29. Modelos lineares e quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*), de parâmetros de crescimento em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes à incremento do TU (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no segundo cultivo.

Balaguera et al. (2008) relataram diminuição em parâmetros de crescimento em mudas de tomate nos tratamentos expostos à seca, corroborando os resultados evidenciados na Tabela 9. Nesse sentido, o crescimento foliar é dos primeiros processos afetados pela diminuição da disponibilidade hídrica. Esse é um mecanismo utilizados pelas plantas para reduzir a superfície evaporativa, e assim reduzir a perda de água por transpiração; e em consequência há menor área foliar e o acúmulo de biomassa e reduzido (Luna et al., 2012). Da mesma forma, a redução da AF indica a capacidade das plantas de tolerar e se aclimatar ao estresse hídrico ocasionado, por meio de respostas morfológicas específicas de adaptação (Khurana e Singh, 2004).

3.3.2.2 Desenvolvimento do sistema radicular

O desenvolvimento do sistema radicular foi afetado negativamente nos menores níveis de umidade para ambos ciclos de tomate. No primeiro ciclo, 40 e 50 % de umidade mostraram desenvolvimento radicular bem menor que os tratamentos de 80, 70, 60 e controle; já no segundo ciclo, o tratamento de 40 % de umidade foi o único que evidenciou menor desenvolvimento frente aos demais (Tabela 10).

Tabela 10. Longitude (cm), área projetada (cm²), área superficial (cm²), diâmetro médio (mm), volume (cm³), número de pontas e altitude de mudas de tomate no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Tomate cv. Santa Cruz Kada									
Primeiro cultivo									
Tratamentos em TU (%) *	Longitude cm	Área Projetada cm ²	Área Superficial cm ²	Diâmetro médio mm	Volume cm ³	Pontas	Altitude	Grupos	
80, 70, 60, Controle	330	17	53	0,51	0,68	454	59	A	
50, 40	284	13	42	0,47	0,50	540	54	B	
CV (%)	20	18	18	8,4	20	28	18		
Segundo cultivo									
80, 70, 60, 50, Controle	390	18	57	0,43	0,65	629	54	A	
40	293	14	43	0,43	0,51	501	56	B	
CV (%)	20	16	16	8,8	17	40	20		

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Ao avaliar crescimento de mudas de tomate, Schwertner et al., (2013) encontraram valores de massa fresca da raiz de aproximadamente de 700 mg, sendo os valores semelhantes aos resultados obtidos no trabalho supracitado. Balaguera et al. (2008), ao avaliar diferentes lâminas de água em mudas de tomate, obtiveram menor comprimento de raiz (218,4 mm) no tratamento de menor suprimento hídrico. Isto concorda com os resultados alcançados neste trabalho, pois o tratamento de 40% de umidade foi aquele que apresentou menor desenvolvimento do sistema radicular.

3.3.2.3 Medidas da fotossíntese

A atividade fisiológica foi diminuída quando as mudas estiveram submetidas a 50 e 40 % de umidade. Assim, no primeiro cultivo em comparação ao grupo de 80, 70, 60 % e controle, esses tratamentos apresentaram redução da taxa fotossintética de 18,5 e 20 %, da transpiração de 18,6 e 38,7%, da condutância estomática de 34,5 e 54,3% e do índice de concentração de CO₂ de 6,4 e 36,6% frente aos outros. O índice intrínseco de eficiência de uso da água do grupo de 40% de umidade foi 1,2 e 1,9 vezes maior, quando comparado aos outros grupos. No segundo cultivo o grupo de 80, 70, 60 % de umidade e controle, também foi superior frente ao grupo com os tratamentos de menores teores de umidade (40 e 50%) com uma redução de 78,0 % na taxa fotossintética, 86,4 % na transpiração, 89,7 % na condutância estomática e 50,4% no índice de concentração de CO₂, respectivamente. Em relação ao índice intrínseco de eficiência de uso da água, este foi o dobro nos tratamentos de 40 e 50% de umidade, frente ao primeiro grupo (Tabela 11).

Tabela 11. *A*: taxa de fotossínteses líquida, *E*: transpiração, *g_s*: condutância estomática, *iC_i*: concentração intracelular de CO₂ e *λWUE*: índice intrínseco de eficiência de uso da água em mudas de tomate no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Tomate cv. Santa Cruz Kada						
Primeiro Cultivo						
Tratamentos em TU (%) *	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>g_s</i>	<i>iC</i>	<i>λWUE</i> (relação <i>A/g_s</i>)	Grupos
	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	mmol m ⁻² s ⁻¹	μmol CO ₂ mol ⁻¹	μmol CO ₂ mol ⁻¹ H ₂ O	
80, 70, 60, Controle	7,0	1,94	81	236	0,873	A
50	5,7	1,58	53	221	1,070	B
40	5,6	1,19	37	151	1,623	C
CV (%)	6	7	15	14	21	
Segundo cultivo						
80, 70, 60, Controle	11,8	2,86	155	256	0,803	A
50, 40	2,6	0,39	16	127	1,634	B
CV (%)	16	24	37	17	21	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo *hotelling* teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Os modelos de regressão ajustados nas variáveis fisiológicas foram lineares e quadráticos no primeiro cultivo de tomate. Foi evidenciado aumento da taxa de fotossínteses líquida em 0,47 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, a cada 10 % de incremento da umidade (Figura 30a). Para transpiração e condutância estomática os modelos quadráticos evidenciaram uma estabilização após 60 % de umidade (Figura 30b, 30c). O modelo quadrático de concentração intracelular de CO₂, teve seu ponto máximo entre 60 e 70 % de umidade (Figura 30d) e finalmente para o *λWUE* o modelo linear foi decrescente (Figura 30e).

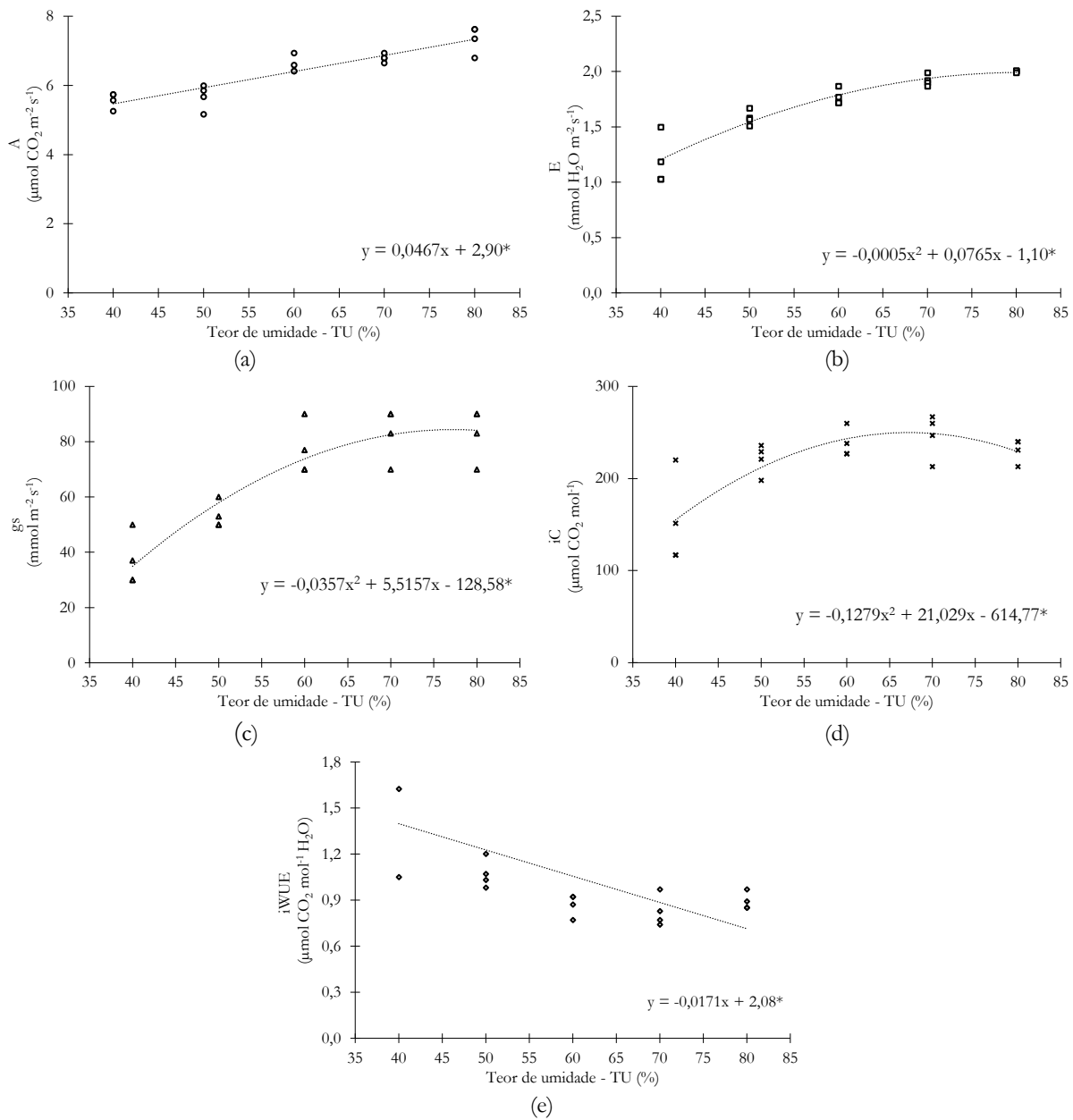


Figura 30. Modelos lineares e quadráticos de parâmetros fisiológicos em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes ao incremento de umidade (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no primeiro cultivo.

Os modelos de regressão ajustados nas variáveis fisiológicas foram na sua maioria lineares no segundo cultivo de tomate. Pode-se observar que a cada 10% de incremento no teor de umidade se tem um $3,3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,85 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $0,05 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $38 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ de aumento na taxa de fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e na concentração intracelular de CO_2 , respectivamente (Figura 31a - 31d). O índice intrínseco de eficiência de uso da água teve um ajuste de modelo linear decrescente semelhante ao evidenciado no primeiro ciclo do tomate (Figura 31e).

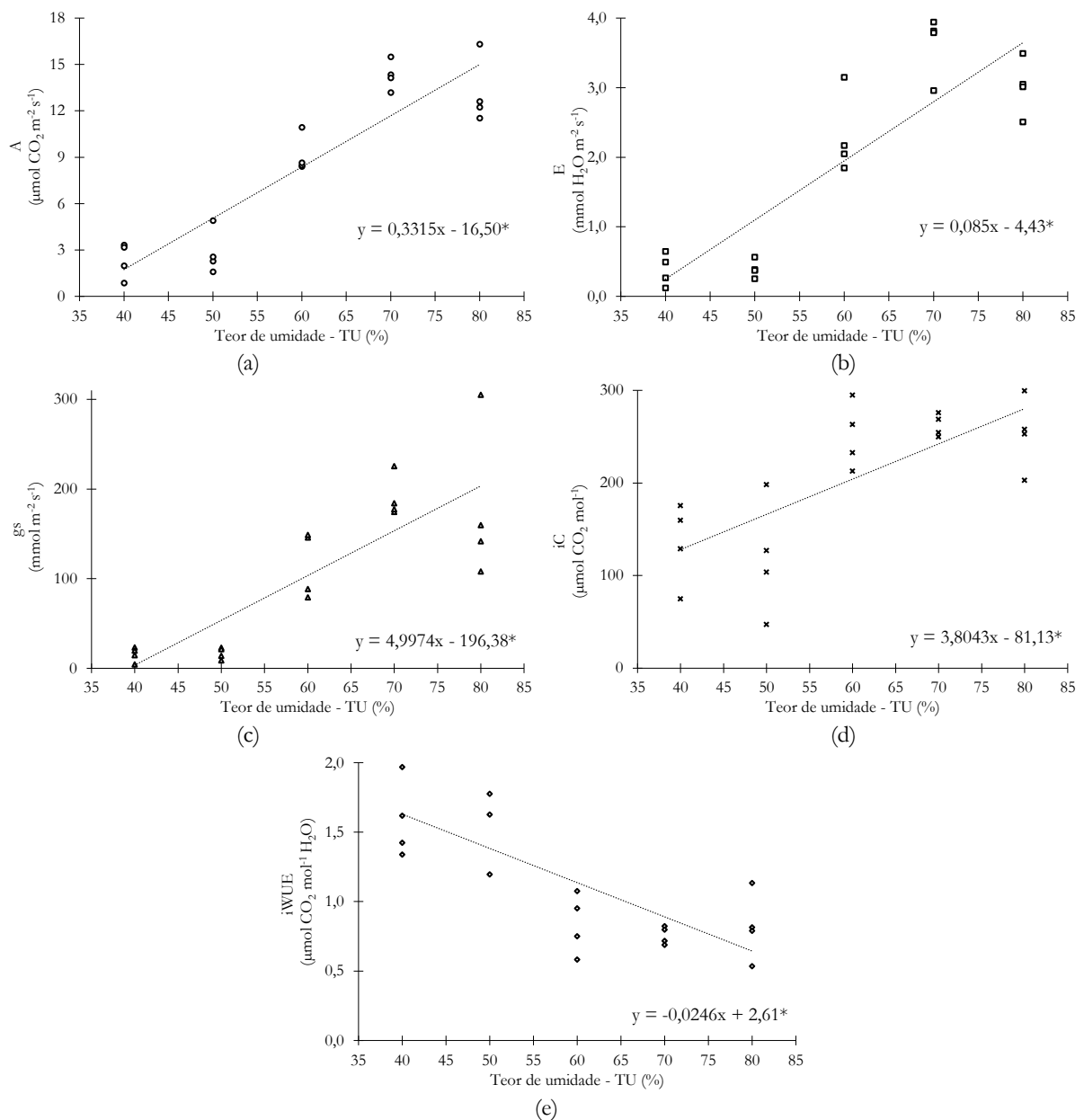


Figura 31. Modelos lineares e quadráticos significativos pelo teste de F em 5% de probabilidade (*), de parâmetros fisiológicos em função da aplicação de lâminas de irrigação correspondentes ao incremento de umidade (%) em mudas de tomate prontas para o transplante no segundo cultivo.

De acordo com diversos autores (Balaguera et al., 2008; Minami, 2010; Gervásio et al., 2014) em condições de ótima umidade relativa, a intensidade luminosa e a temperatura do ar são os fatores ambientais que mais influenciam a atividade fisiológica quando não se apresenta nenhum tipo de estresse abiótico. Quando acontecem eventos de estresse hídrico, é reduzida a taxa fotossintética significativamente em plantas de tomate (Balaguera et al., 2008). Por este motivo pode-se afirmar que houve limitação na atividade fisiológica para os tratamentos de 40 e 50% de umidade (Tabela 11 e Figuras 30a – 30e, 31a – 31e), nos quais o crescimento da parte aérea e do sistema radicular também foi afetado como se evidencia nas Tabelas 9 e 10. Estes resultados são corroborados por Machado et al. (2013), que avaliaram o efeito da deficiência hídrica em cana de açúcar, e também encontraram redução da assimilação de CO_2 em função da

deficiência hídrica, pois os tratamentos de déficit hídrico apresentaram as médias mais baixas de condutância estomática.

3.3.2.4 Análise de imagens multiespectrais

As mudas que se mantiveram com 80 e 60 % de umidade, no final do ciclo apresentadas valores de fluorescência, refletância e índices de antocianinas e clorofilas, superiores às mudas mantidas em 70, 50, 40 % de umidade e controle (Tabela 12). Para ambos grupos, a eficiência quântica máxima do fotossistema II foi igual.

Tabela 12. F0: fluorescência mínima, Fm: fluorescência máxima, Fv/Fm: eficiência quântica máxima do fotossistema II, Red: refletância no vermelho, Green: refletância no verde, Blue: refletância no azul, ChlIdx: índice de clorofila A, AriIdx: índice de antocianinas, Chl₇₁₀: fluorescência de clorofilas a 710 nm de mudas de tomate no momento do transplante sob influência de níveis de umidade no substrato em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Tomate cv. Santa Cruz Kada										
Tratamentos em TU (%) *	F0	Fm	Fv/Fm	Red	Green	Blue	ChlIdx	AriIdx	Chl ₇₁₀	Grupos
80, 60	3394	12891	0,74	2938	4769	1392	2,57	4,42	33244	A
70, 50, 40, Controle	3122	12091	0,74	2809	4484	1362	2,59	4,47	31350	B
CV (%)	6,4	7,2	2,2	9,7	8,4	8,8	7,6	11	7,6	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,1 de significância.

Ribeiro (2003), avaliando o efeito do estresse por clorose variegada em mudas de laranjeira, evidenciou valores superiores de Fv/Fm em plantas infetadas pela doença, indicando a ocorrência de dano no sistema fotossintético por causa da doença. Neste trabalho o índice Fv/Fm mostrou valores iguais para todos os tratamentos, provavelmente devido ao fato de que o estresse hídrico no tratamento de 40% de umidade não ter causado danos permanentes do sistema fotossintético, pois se deu em pequenos períodos de tempo, permitindo as plântulas sua recuperação logo após a seguinte irrigação; porém, houve claras restrições fisiológicas e morfológicas como foi evidenciado nos resultados anteriormente descritos.

3.3.2.5 Teor de clorofila e carotenoides

Os níveis de clorofila e carotenoides nas mudas de tomate apresentaram influência pelos teores de umidade implementados. A clorofila total foi 8,5 % menor no 80 e 70 % de umidade em relação aos demais tratamentos para o primeiro cultivo. No segundo cultivo, o tratamento de 80 % de umidade evidenciou os menores teores de pigmentos; dessa maneira o teor de clorofila total e carotenoides foram um 43 e 40 % mais baixos respectivamente, que nos tratamentos de 60, 50 e 40 % de umidade.

Tabela 13. Teores de clorofila A, clorofila B, clorofila total e carotenoides (mg g^{-1}) de mudas de tomate no momento do transplante, sob influência de níveis de umidade no substrato representados em teor de umidade – TU (%) cultivadas em casa de vegetação e comparados com o manejo do produtor (controle).

Mudas de Tomate cv. Santa Cruz Kada					
Primeiro cultivo					
Tratamentos em TU (%) *	Clorofila A	Clorofila B	Clorofila total	Carotenoides	Grupos
	mg g ⁻¹ de massa fresca				
60, 50, 40, Controle	1,94	0,40	2,34	0,68	A
80, 70	1,60	0,54	2,14	0,69	B
CV%	7,2	28	6,0	9,2	
Segundo cultivo					
60, 50, 40	2,07	0,47	2,54	0,78	A
70, Controle	1,63	0,40	2,03	0,62	B
80	1,20	0,25	1,45	0,47	C
CV (%)	9,4	30	13	9,0	

*Médias seguidas por letras distintas, nos grupos, diferem entre si pelo hotelling teste com correção de Bonferroni a 0,05 de significância.

Corroborando os resultados mostrados na Tabela 13, Rahimi et al. (2013) indicam que os teores de clorofila podem ser aumentados em plantas submetidas a estresse hídrico. No mesmo sentido, Bezerra et al., (2019) relatou aumento dos níveis de clorofila B (assim como no segundo cultivo) em mudas de alface submetidas a estresse hídrico, e como evidenciado na Tabela 9, também esses tratamentos levaram à obtenção de mudas com menor área foliar, e consequentemente maior concentração deste pigmento.

Tabela 14. Correlação entre os componentes principais e as variáveis estudadas no cultivo de tomate

Variáveis	Primeiro cultivo		Segundo cultivo	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Área foliar (AF)	0,87	-0,09	0,38	0,64
Massa seca da parte aérea (PSPA)	0,60	0,22	0,66	0,50
Massa seca da raiz (PSR)	0,34	0,10	0,76	0,00
Massa seca do caule (PSCau)	0,71	-0,32	0,61	0,57
Massa seca total (PSt)	0,78	0,14	0,78	0,44
Altura de plantas (Alt)	0,83	0,23	0,76	0,10
Diâmetro do caule (DCau)	0,33	0,61	0,57	-0,30
Clorofila A (ChrA)	-0,04	0,87	-0,75	0,00
Clorofila B (ChrB)	0,27	-0,36	-0,58	-0,31
Carotenoides (Carot)	0,34	0,27	-0,70	-0,04
Longitude de raiz (Length)	0,72	0,45	0,85	0,01
Area projetada de raiz (ProjArea)	0,88	0,24	0,87	-0,31
Area Superficial de raiz (SurfArea)	0,88	0,24	0,87	-0,31
Diâmetro médio de raiz (AvgDiam)	0,71	-0,52	0,01	-0,74
Volume de raiz (RootVolume)	0,94	0,06	0,71	-0,47
Quantidade de pontas (Tips)	-0,06	0,51	0,42	0,39
Altitude	0,52	0,55	0,03	0,40
Taxa de fotossínteses neta (Fotosint)	0,74	-0,47	0,92	-0,13
Condutância estomática (Conduktiv)	0,82	-0,33	0,85	-0,21
Índice intrínseco de eficiência de uso da água (iWUE)	-0,78	0,15	-0,79	0,37
Transpiração (Transp)	0,84	-0,32	0,89	-0,12
Eigenvalue	9,57	3,17	10,36	2,87
Variância Total (%)	45,58	15,14	49,34	13,69

A PCA das variáveis da Tabela 14 e determinadas dos seis tratamentos no primeiro ciclo de tomate explicou 60,72% (45,58 % para- PC1 e 15,41% para PC2) da variância contida no conjunto original dos dados (Tabela 14). Dentre as variáveis AF, PSPA, PSCau, PSt, Alt, Length, ProjArea, SurfArea, AvgDiam, RootVolume, Altitude, Fotosint, Conduktiv, iWUE e Transp foram relevantes para PC1, com coeficiente de correlação acima de 0,5. O PC1 explicou 45,58 % (eigenvalue igual a 9,57) da variância, os parâmetros de maior poder discriminatório neste

componente foram: AF (0,87), PSPA (0,60), PSCau (0,71), PSt (0,78), Alt (0,83), Length (0,72), ProjArea(0,88), SurfArea (0,88), AvgDiam (0,71), RootVolume (0,94), Altitude (0,52), Fotosint (0,74), Condutiv (0,82), iWUE (-0,78) e Transp (0,84). O PC2 explicou 14,14% (eigenvalue igual a 3,17) da variância, o DCau (0,61), ChrA (0,87), AvgDiam (-0,52) e Tips (0,51) e Altitude (0,55) foram as variáveis que tiveram maior poder discriminante atuando de forma direta.

Para o segundo ciclo de tomate, a PCA de todas as variáveis da Tabela 14, e determinadas a partir dos seis tratamentos aplicados, explicou 61,03% (49,34 % para PC1 e para PC2 13,69 %) da variância contida no conjunto de dados. O PC1 explicou 49,34 % (eigenvalue igual a 10,36) da variância, assim as variáveis PSPA (0,66), PSR (0,76), PSCau (0,61), PSt (0,78), Alt (0,76), DCau (0,57), ChrA (-0,75), ChrB (-0,58), Carot (-0,70), Length (0,85), ProjArea (0,87), SurfArea (0,87), RootVolume (0,71), Fotosint (0,92), Condutiv (0,85), iWUE (-0,79) e Transp (0,89) foram as que apresentaram maior poder discriminante. O PC2 explicou 13,69% (eigenvalue igual a 2,87) da variância, e as variáveis que evidenciaram maior poder discriminante para este componente foram: AF (0,64), PSPA (0,50) e AvgDiam (-0,74).

No PCA as variáveis com sinais iguais interagem diretamente, ou seja, com o aumento no valor de uma, há aumento no valor de outra, ou vice-versa, enquanto as variáveis com sinal contrário interagem inversamente, isto é, enquanto uma aumenta o valor da outra diminui (Pinto et al., 2021). Dessa maneira se observa como em ambos os ciclos são positivos parâmetros como a massa seca da parte aérea, e negativos os valores de diâmetro médio de raiz junto com Índice intrínseco de eficiência de uso da água, indicando sua interação inversa.

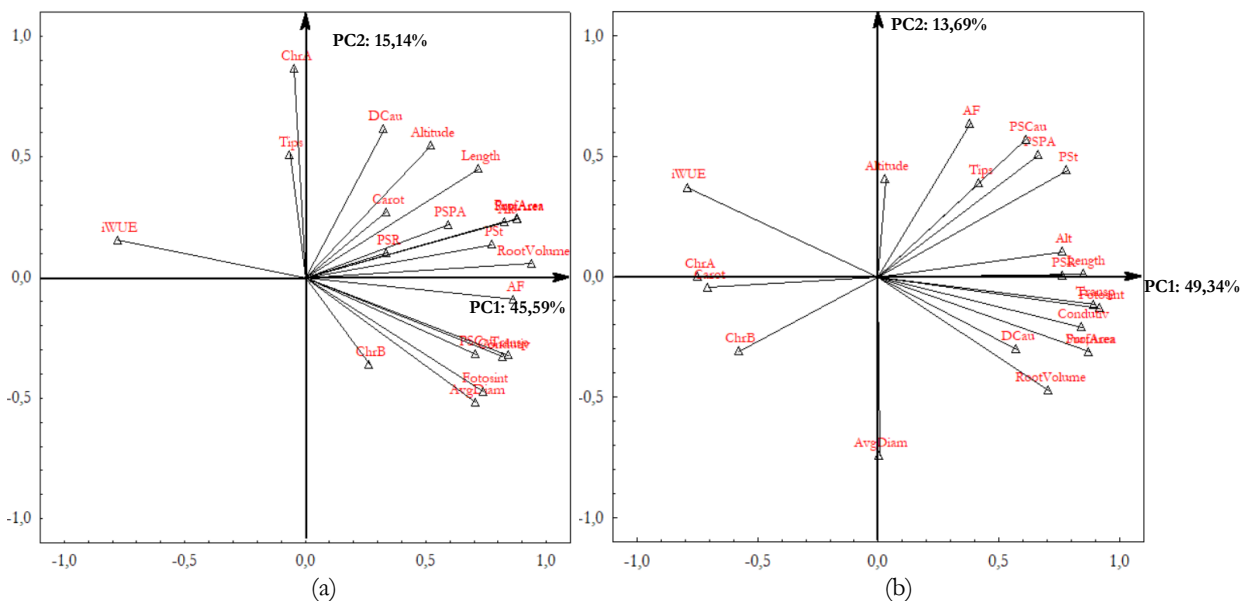
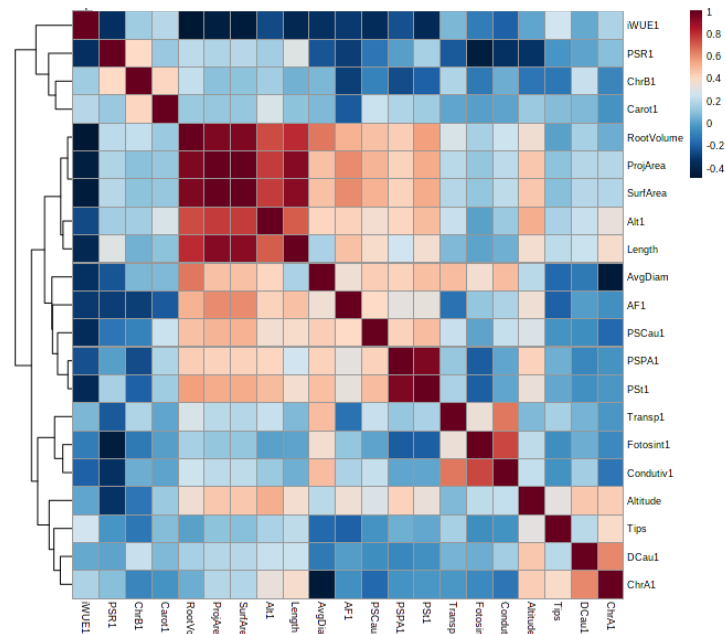


Figura 32. Distribuição das variáveis nos componentes principais no primeiro (a) e segundo (b) cultivo de tomate.

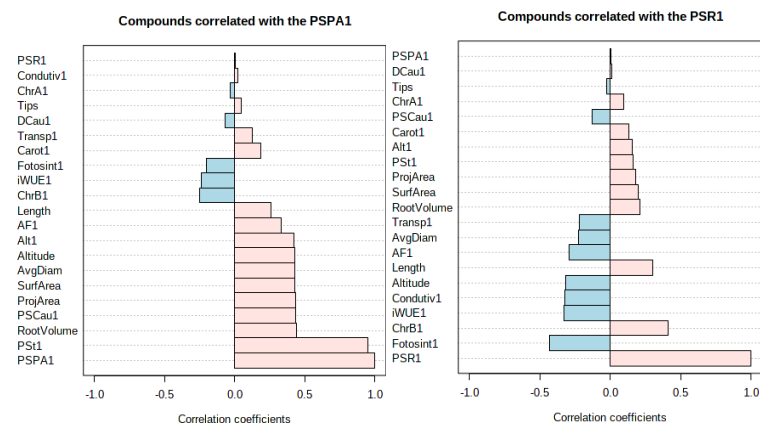
Nos gráficos biplot (Figuras 32a e 32b) construídos a partir dos escores das variáveis e as cargas fatoriais do PC1 e PC2, verifica-se a discriminação dos elementos localizados à direita a esquerda (PC1) e da parte superior a inferior (PC2) (Hair et al., 2005). Segundo Sousa et al. (2018), a influência de um vetor na análise é medida pelo comprimento do mesmo. Assim, para o presente estudo, quase todas as variáveis apresentaram a mesma influencia, com exceção do ChrB, PSr e Tips para primeiro ciclo (Figura 33a) e para o segundo a Altitude (Figura 32b).

Na matriz de correlação do primeiro ciclo de tomate pode ser observado correlações positivas e negativas entre os diferentes parâmetros avaliados. Destacam-se correlações positivas entre as características do sistema radicular, entre transpiração, taxa fotossintética e condutividade estomática (Figura 33a). Foram evidenciadas correlações

negativas entre volume de raiz, área projetada, área superficial, comprimento de raiz, diâmetro médio de raiz, massa seca do caule e massa seca total com o Índice intrínseco de eficiência de uso da água. Da mesma maneira, correlaciones negativas entre o diâmetro médio de raiz e o teor de clorofila a (Figura 33a). Para peso seco da parte aérea, algumas características do sistema radicular foram correlacionadas positivamente (Figura 33b), e a massa seca da raiz apresentou correlações negativas entre a taxa fotossintética (Figura 33b).



(a)



(b)

(c)

Figura 33. Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no segundo cultivo de tomate.

No segundo ciclo de tomate, a matriz de correlação indicou correlações positivas entre as características do sistema radicular e negativas entre o índice intrínseco de uso eficiente da água com a transpiração e condutividade estomática (Figura 34a). Assim foram confirmados os resultados dos PCA, indicando que plantas sometidas a menor

umidade do substrato evidenciaram maior *iWUE*, ou seja, apresentaram estresse hídrico pois sua atividade fisiológica foi reduzida (Figura 34a). Em relação a massa seca da parte aérea e da raiz, houve uma correlação positiva com taxa fotossintética e condutividade estomática (Figura 34b e 34c), e o *iWUE* se correlacionou negativamente com a massa seca da raiz (Figura 35c).

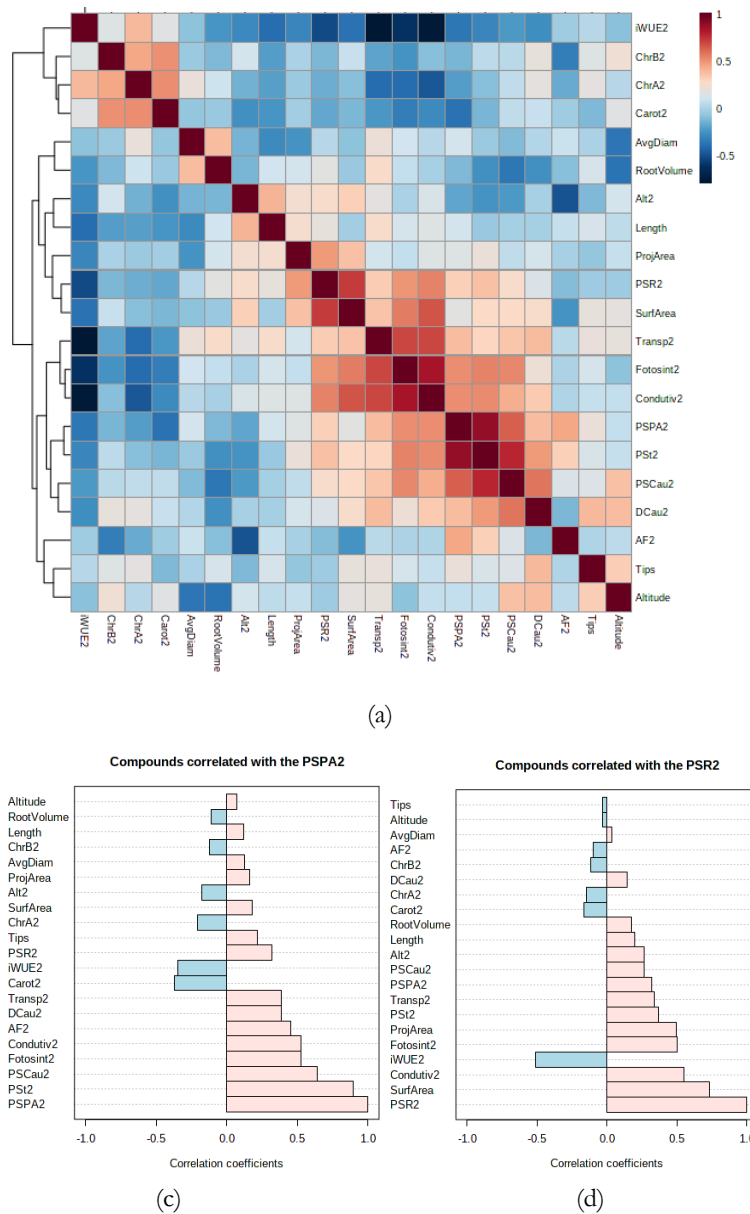


Figura 34. Matriz de correlação (a) e correlações de Spearman da massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) no segundo cultivo de tomate.

3.3.2.6 Teores de macronutrientes nas folhas

As análises de nutrientes evidenciaram teores foliares médios entre todos os tratamentos de 14, 4, 33, 10, 3 e 4 g kg⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, pois não foram evidenciadas diferenças significativas. De acordo com Minami e Mello, (2017) estes valores se encontram adequados para mudas de tomate.

3.3.3 Eficiência do uso de água

No primeiro cultivo de tomate os tratamentos que apresentaram maior eficiência de uso da água foram 60 % de umidade e o controle. Houve eficiência do uso da água semelhante entre 80, 70, 50 e 40 % de umidade para o primeiro ciclo e em relação ao segundo ciclo, todos os tratamentos mostraram valores próximos entre si para este parâmetro (Figura 36)

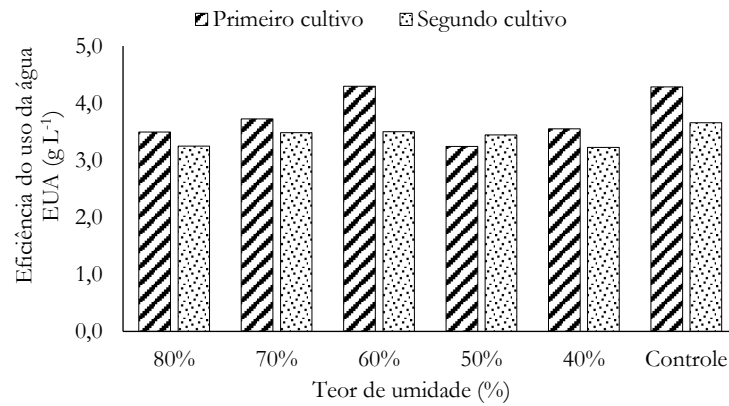


Figura 35. Eficiência do uso da água no primeiro e segundo cultivo de tomate.

4. CONCLUSÕES

Os lisímetros de pesagem foram eficientes no monitoramento da umidade do substrato e para determinar a E_{Tc} e o K_c no sistema de produção de mudas de hortaliças.

No geral, plantas submetidas a 40 % de umidade apresentaram menor desempenho quanto ao crescimento, desenvolvimento do sistema radicular e atividade fisiológica. Também, apresentaram menor área foliar e altura, e maior teor de clorofila B e incremento do diâmetro médio da raiz, assim como altos valores no índice intrínseco do uso da água.

Mudas submetidas a faixas de 60 e 70 % de umidade evidenciaram consumo hídrico moderado e qualidade semelhante ao controle; portanto, manter esse nível de umidade no substrato é indicado para reduzir o consumo hídrico e produzir mudas de alta qualidade.

REFERÊNCIAS

- ALLAIRE, S.; CARON, J.; MÉNARD, C.; DORAIS, M. Growing media varying in particle size and shape for greenhouse tomato. *Acta Horticulturae*, v.644, p.307-311, 2004.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. RAES, D; SMITH M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - Rome: FAO, 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56). 1998.
- ALVES¹, J. J.; SILVA, T. J. A.; SILVA, C. R.; ATARASSI, R. T.; FOLEGATTI, M. V. Padronização da técnica de lisimetria na determinação do consumo de água pelas plantas. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 2004, Porto Alegre. Anais, 2004.
- ALVES², F. A.; MARTINEZ, H. E. P.; DA SILVA, D.J.H.; JOSÉ GERALDO BARBOSA, G. J. Produção de mudas de tomateiro por meio de estacas enraizadas em Hidropônia. 2004.
- ANTONIO, I. C.; ARAÚJO J. A. C. Perfil horizontal da temperatura diurna em cultivo de alface, no sistema de hidroponia NFT, em Jaboticabal (SP). *Científica, Jaboticabal*, v.32, n.1, p.30-34. 2004.
- BALAGUERA, H. E.; HERRERA, J. G. A. Y RODRÍGUEZ, J. D. Efecto del déficit de agua en el trasplante de plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana* 26(2), 246-255, 2008.
- BARBOSA, S. Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação. Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2015.
- BEZERRA, A.C.; VALENÇA, D.A.; CARVALHO, D.F.; PINHO, C.A.; REINERT, F.; GOMES, D. P.; GABETTO, F.P.; AZEVEDO, R. A.; MASSERONI, D. & MEDICI, L.O. Automation of lettuce seedlings irrigation with sensors deployed in the substrate or at the atmosphere. *Sci. Agric.* v.76, n.2, p.179-189. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0163>.
- BIERNBAUM, J. A. AND VERSLUYS, N. B. Water management. *HortTechnology*, Alexandria, v. 8, n. 4, p. 504-509. 1998.
- BOROWSKI, E.; NURZYŃSKI, J. Effect of different growing substrates on the plant water relations and marketable fruit yield greenhouse-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Acta Agrobotanica*, 65(3):49-56. 2012.
- BRANDÃO FILHO, J.U.T.; CALLEGARI, O. Cultivo de hortaliças de frutos em solo em ambiente protegido. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, v. 20, n. 200/201, p. 64-68, 1999.
- CAMPECHE, L.F. de SOUZA. M. Construção, calibração, e análises de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evaporação da cultura da lima ácida Tahiti (*Citrus latifolia* Tan.) Piracicaba, 67p. Tese (doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 2002
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B; GUERRA, G. M.; CRUZ, A. C.; SOUZA, P. S. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.27, n.2, p.363-372. 2007.
- CARVALHO, H. P.; MELO, B.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R.; SILVA, C. R.; MORAES, M. R. B. Desenvolvimento de lisímetro de pesagem na cultura do café. *Bioscience Journal (UFU. Impresso)*, v. 29, p. 1750-1760. 2013.
- CASTELLANOS, J. Manual de producción de tomate bajo invernadero. INTAGRI. 460p. 2009.
- DE JONG VAN LIER, Q. 2020. Física do solo - baseada em processos. 1. ed., v. 1. 413p. 2020.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979.

- DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande, PB: UFPB, 306p. 1994.
- EMBRAPA. Recomendações técnicas para o cultivo do tomate industrial em condições irrigadas. Circular técnica no. 30. 52p. 1994.
- ENGELBRECHT, B. M. J. AND KURSAR, T. A. Comparative drought resistance of seedlings of 28 species of co-occurring tropical woody plants. *Ecologia* 136: 383-393. 2003.
- FERMINO, M.H. O uso da análise física na avaliação da qualidade de componentes de substratos. Em: caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas. III encontro Nacional de substratos para plantas. Instituto agrônomo de campinas. 29-37p. 2002.
- FERNANDES, C., VIEIRA, N.; AZEVEDO, B. M.; VIANA, T. V. A.; BOMFIM, G., V.; MESQUITA J. B. R. Instalação e calibração de um lisímetro de precisão com uma célula de carga. *Irriga, Botucatu*, v. 17, n. 2, p. 251-263, abril - junho, 2012.
- FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; ARAÚJO, J.A.C. Utilização do tanque “Classe A” para a estimativa da evapotranspiração de referência dentro da casa de vegetação. *Engenharia Agrícola-Jaboticabal*, 24(1):46-50. 2004.
- FURLAN, R. A.; FOLEGATTI, M. V.; SENTELHAS, P. C. Efeito da nebulização e ventilação natural na redução da temperatura do ar em ambiente protegido *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 181-186, 2001.
- GERVÁSIO, E.S; FERREIRA DE MELO, J.C. Utilização da técnica de lisimetria de pesagem na automação de um sistema de irrigação localizada para uso no manejo da irrigação de cultivos em recipientes. *Irriga*, 19(4):626-640. 2014.
- GIRARDI, L.B.; PEITER, M.X.; BELLÉ, R.A.; ROBAINA, A.D.; TORRES, R.R.; KIRCHNER, J.H., BEM, L.H.B. Evapotranspiração e coeficiente de cultura da alstroemeria (*alstroemeria x hybrida*) cultivada em estufa. *Irriga*, 21(4):817-829. 2016.
- GONÇALVES, A.L. Mudanças de alta qualidade em floricultura. Produção de mudas de hortícolas de alta qualidade, p. 1 – 15. USP/Sebrae, Piracicaba. 1994.
- GUISELINI, C.; SENTELHAS P. C; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Manejo da cobertura de ambientes protegidos: Radiação solar e seus efeitos na produção da gerbera. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.14, n.6, p.645–652. 2010.
- GUISELINI, C.; SENTELHAS P. C; PANDORFI, H.; HOLCMAN, E. Temperatura e umidade do ar em ambientes protegidos cobertos com plástico transparente associado à malha termo-refletores, instalada externa e internamente. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 15 (1), 157-162. 2007.
- HAIR, J. R.; ANDERSON, R. E. e TATHAM, R. L. Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Buckman, 2005. 593p.
- HOLCMAN, E.; SENTELHAS, P. C. AND MELLO, S. C. Cherry tomato yield in greenhouses with different plastic covers Produção de tomate cereja em ambientes protegidos com diferentes coberturas plásticas *Ciência Rural*, v.47, n.10, 2017.
- HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) *Lysimeter for evapotranspiration and environmental measurements*. New York: American Society of Civil Engineers, p. 1-9. 1991.
- KAMPF, A.N. Uso de substrato em cultivo protegido no agronegócio brasileiro. Em: caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas. III encontro Nacional de substratos para plantas. Instituto agrônomo de campinas. 1-6p. 2002.

- KHURANA, E. AND J. S. SINGH. Germination and seedling growth of five tree species from tropical dry forest in relation to water stress: Impact of seed size. *J. Trop. Ecol.* 20: 385-396. 2004.
- LATIMER, J.G. & SEVERSON, R.F. Effect of mechanical and moisture stress conditioning on growth and cuticle composition of broccoli transplants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science 122: 788 – 791, 1997.
- LATIMER, J.G. Drought, paclobutrazol, abscisic acid, and gibberellins acid as alternatives to daminozide tomato transplant production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science 117(2):243-247. 1992. DOI: 10.21273/JASHS.117.2.243.
- LOPES C A; DA SILVA J B C; GUEDES Í M. doenças em Cultivos Hidropônicos e Medidas de Controle. Comunicado técnico 107. 12p. 2015.
- LUNA, F. W.; ESTRADA, M. H.; JIMÉNEZ, O. J. M. AND PINZÓN, L.L. Effect of Water Stress on Growth and Water use Efficiency of Tree Seedlings of Three Deciduous Species. *Terra latinoamericana* v. 30 n. 4, 30: 343-353. 2012.
- MACHADO, D. F.; LAGÓA, A. M.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, R. S. E MACHADO, E. C. Baixa temperatura noturna e deficiência hídrica na fotossíntese de cana-de-açúcar. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.48, n.5, p.487-495. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000500004>
- MAGRO, F.O.; SALATA, A.C.; BERTOLINI, E.V.; CARDOSO, A.I.I. Produção de repolho em função da idade das mudas. *Revista Agro@mbienteOn-line*, v. 5, n. 2, p.119-123, maio-agosto, 2011.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do Estado Nutricional das Plantas. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: Princípios e métodos. 3ra. Ed. Viçosa: UFV. 318p. 2009.
- MAROUELLI, W. A., SILVA, W.L.C. Irrigação na cultura do pimentão. Circular Técnica 101. Embrapa hortaliças. 20p. 2012.
- MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C. E SOUSA, V. F. Cap 5: Manejo da água de irrigação. In: *Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças*. 158-232p. 2011.
- MINAMI, K.; MELLO, S. C. Fisiologia e Nutrição do tomateiro. 1. ed. Curitiba: Senar. v. 1. 1200p. 2017.
- MINAMI, K.; SALVADOR, E. D. Substrato para plantas. Piracicaba: USP/ESALQ; Degaspari, 209p. 2010.
- NASCIMENTO, E. F.; CAMPECHE, L. F.; BASSOI, L. H.; SILVA, J. A.; LIMA, A. C.; PEREIRA, A. C. Construção e calibração de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo em videira de vinho cv. Syrah. *Irriga, Botucatu*, v. 16, n. 3, p. 271-287. 2011.
- NUNES, M.U.C. Produção de mudas de hortaliças com o uso de plasticultura e do pó de coco. Circular Técnica Embrapa Tabuleiros Costeiros, n. 13. 29p. 2000.
- OVIDO, V.R.; MINAMI, K. Producción de tomate tipo italiano en función del volumen de la celda y de la edad de las mudas. *Bragantia*, 71(1): 21-27. 2012.
- PEZZOPANE, J.E.M.; OLIVEIRA, P.C.; REIS, E.F.; LIMA, J.S.de. Alterações microclimáticas causadas pelo uso de tela plástica. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.24, n.1, p.9-15, jan./abr. 2004.
- PINTO, A. A.; CAMARA, F. T.; LOPES, A.; LIMA, L. P. AND PINTO, L. A. Multivariate analysis to identify groups of biodiesels in the operation of an agricultural engine. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. v.16, n.3, e8663. 2021.

- QUAGLIA, L. Calibração de um lisímetro de pesagem para monitoramento da evaporação do solo sem cobertura vegetal. 2005. 104p. (Dissertação de Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- RADIN, B.; REISSER JÚNIOR, C.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. Horticultura Brasileira, Brasília, v.22, n.2, p.178-181, 2004.
- RAHIMI, A.; SAYADI, F.; DASHTI, H. & TAJABADI POUR, A. Effects of water and nitrogen supply on growth, water-use efficiency and mucilage yield of isabgol (*Plantago ovata* Forsk). Journal of Soil Science and Plant Nutrition 13: 341-354. 2013.
- RAMOS, 2009. Manejo del cultivo de Tomate en invernadero Cap. 3: in: CASTELLANOS, J. Manual de producción de tomate bajo invernadero. INTAGRI. 460p. 2009.
- REBOUÇAS, P. M.; DIAS, I. F.; ALVES, M. A.; BARBOSA FILHO, J. A. D. Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, v. 7, n. 2, p. 115-125. 2015.
- REGENT INSTRUMENTS Inc. Image analysis systems for plant scientists. WinRhizo™. Analyser of washed roots and Arabidopsis seedlings. 7p. 2021.
- RINCÓN, L.; SÁEZ, J. Determinación de la evapotranspiración y de los coeficientes de cultivo en lechuga Iceberg con riego por goteo. Actas de Horticultura, 19:193-201. 1997.
- RIVEIRO, R. V. Influência da temperatura na fotossíntese de laranja pera com clorose variegada dos citros. Dissertação de mestrado – ESALQ/USP. 73p. 2002
- ROBAYO, R. D.; HERRERA, J. G.; REYES, A. J.; HERRERA, O. F. AND ROBAYO, A. L. Evaluation of the growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a closed recirculating hydroponic system. Agronomía Colombiana 35(2), 216-222. 2017.
- ROMANINI, C. E. B.; GARCIA, A. P.; ALVARADO, L. M.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(11):1193-1201. 2010.
- RSTUDIO TEAM. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>. 2021.
- SANTANA, C.V.S.; ALMEIDA, A.C.; TURCO, S.H.N. Produção de alface roxa em ambientes sombreados na região do Submédio São Francisco – BA. Revista Verde, Mossoró, v.4, n.3, p.1-6, 2009.
- SANTOS, L. L.; SEABRA JÚNIOR, S.; NUNES, M. C. M. Luminosidade, temperatura do ar e do solo em ambientes de cultivo protegido. Ciências Agro-Ambientais, 8(1):83-93. 2010.
- SCHWERTNER, Diogo Vanderlei et al. Produtividade de alface e qualidade de mudas de tomateiro com bioproduto de batata. Cienc. Rural, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 404-410, Mar. 2013.
- SANCHEZ, C.A.; SNYDER, G.H.; BURDINE, H.W. DRIS evaluation of nutritional status of crisphead lettuce. HortScience, Alexandria, n.26, n.3, p.274-6, 1991.
- SENTELHAS, P. C. Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática (Teses de Doutorado, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"). 1998.
- SHARMA, P.; KOTHARI, M. and LAKHAWAT, S. S. Water requirement on drip irrigated tomatoes grown under shade net house. Engg. & Tech. in India, 6 (1): 12-18. 2015.
- SILVA, D.; FOLEGATI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Weighing lysimeter working analyse with load cell. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-58. 1999,

- SILVA, H R., CARRIJO, O.A. MARQUELLI, W.A., DOS REIS, N.B.V. Competição de cultivares de pepino tipo “Japones” sob cultivo protegido e a campo aberto. Embrapa hortaliças. P.A. no. 10, p. 1 – 5. 1998.
- SOUSA, H. S.; TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SOUZA, É. C.; ARRIEL, D. A. A.; MEDEIROS, R.A. Análise multivariada de atributos químicos e físicos do solo em sistema agroflorestal com teca. *Revista Scientia Agraria*, v. 19, p. 87-93, 2018.
- TAGLIAFERRE, C.; DE PAULA, A.; LEMOS, O. F.; ROCHA, F. A.; SILVA, J G. Influência da lâmina de água e consumo hídrico no crescimento inicial de cinco essências florestais. *IRRIGA*. 24. 303-319. 10.15809/irriga.2019v24n2p303-319. 2019.
- TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L.; GENTELINI, D. P.; GABRIEL FILHO, A.; KONOPATSKI, E. A. Uso do forno de microondas na determinação da umidade em diferentes tipos de solo. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 29, n. 3, p. 529-537, 2008.
- TESTZLAF, R. Irrigação: métodos, sistemas e aplicações. Campinas, FEAGRI- Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 203p. 2011.
- TRANI PE; FELTRIN DM; POTT CA; SCHWINGEL M. 2007. Avaliação de substratos para produção de mudas de alface. *Horticultura Brasileira* 25: 256-260. 2007.
- VÁSQUEZ, M. A. N; FOLEGATTI, M. V; DIAS, N. S; SILVA, C. R. Efeito do ambiente protegido cultivado com melão sobre os elementos meteorológicos e sua relação com as condições externas. *Engenharia Agrícola*, 25(1):137-143. 2005.
- ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, M. F.; JÚNIOR F. F. Solos e Nutrição de Plantas. *Bragantia* 73 (3). 2014. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0086>.

APÊNDICE

Códigos de programação para a plataforma do Arduino

```
// --- BIBLIOTECAS ---
// Relogio
// #include <DS3231.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
RTC_DS3231 rtc;
// Pinos A4 e A5 configurados do Real Time Clock

// LCD
#include <LiquidCrystal.h>
// Pinos de inicialização
LiquidCrystal lcd(9, 8, 7, 6, 5, 4, 3);

// Memoria micro SD
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = 10; // CS do SD

//Definicao da balanca 1
#include "HX711.h"
#define DOUT_A A0 //Pin dado
#define CLK_A A1 //pin clock
HX711 balancaA(DOUT_A, CLK_A); //Criação de objeto

//Definicao da balanca 2
// #include "HX711.h"
#define DOUT_B A2 //Pin dado
#define CLK_B A3 //pin clock
HX711 balancaB(DOUT_B, CLK_B); //Criação de objeto
/*
*/

// --- DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS INTERNAS ---

// Sinalizador de gravacao SD
bool guardado=false;

// Indicadores visuais
int OKBal1=0;
int OKBal2=2;
// Sinalizador para piscar os indicadores visuais abaixo do limite inferior
bool auxbal1=false;
bool auxbal2=false;

//Limites entre os quais os indicadores visuais vão ligar
float LimiteLowBal1=980; // limite inferior balança 1
float LimiteHighBal1=1050; // limite superior balança 1
float LimiteLowBal2=980; // limite inferior balança 2
float LimiteHighBal2=1050; // limite superior balança 2
// Fim dos limites

// --- ConFigurações Iniciais ---
void setup() {
  // Teste dois leds
  pinMode(OKBal1, OUTPUT);
  pinMode(OKBal2, OUTPUT);
  digitalWrite(OKBal1, HIGH); // liga o LED verde balança 1
  digitalWrite(OKBal2, HIGH); // desliga o LED verde balança 1
  delay(2000);
  digitalWrite(OKBal1, LOW); // liga o LED azul balança 2
  digitalWrite(OKBal2, LOW); // liga o LED azul balança 2
}
```



```

rtc.begin();           //Inicializa RTC
// apresentação info inicial balança A
lcd.begin(16, 2);
// Verificando a balança
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("BALANCA A");
delay (500);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Leitura ADC: ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(balanzaA.read());
delay (500);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Espere Tarando A");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("LISIMETRO A");
balanzaA.set_scale(228500); // Estabelecemos a escala em g
balanzaA.tare(20); //O peso actual considerado Tara.
delay (500);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Pronto pra pesar");
delay (500);
lcd.clear();

// apresentação info inicial balança B
lcd.begin(16, 2);
// Verificando a balança
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("BALANCA B");
delay (500);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Leitura ADC: ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(balanzaB.read());
delay (500);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Espere Tarando B");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("LISIMETRO B");
balanzaB.set_scale(171900); // Estabelecemos a escala em g (calibração)
balanzaB.tare(20); //O peso actual considerado Tara.
delay (500);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Pronto pra pesar");
delay (500);
lcd.clear();

/*
*/

// Abre a comunicação serial e aguarda pela porta:
//Serial.begin(9600);
//while (!Serial) {
//; // Águarda a comunicação serial. porta nativa USB
//}

// Verificação da SD CARD
pinMode(chipSelect, OUTPUT);
//Serial.print("Carregando SD..."); // verificação no monitor serial
lcd.print("Carregando SD");
delay (500);

```

```

lcd.clear();
// Verifica presença de SD e se conectada inicializa
if (!SD.begin(chipSelect)) {
  //Serial.println("SD nao carregada");
  // Se não está carregada o programa segue mais não grava:
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("SD:");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Nao carregada");
  delay (1000);
  lcd.clear();
  return;
}
//Serial.println("SD carregada");
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("SD:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Carregada");
delay (1000);
lcd.clear();
} //end setup

// --- Loop Infinito ---
void loop() {
  //verifica a data e hora
  DateTime now = rtc.now(); // pega a data do relógio
  // extrai a informação da data numa variável buffer
  char bufferFecha[6];
  sprintf(bufferFecha, "%02d/%02d", now.day(), now.month());
  // do data time extrai a informação da hora numa variável buffer
  char bufferHora[5];
  sprintf(bufferHora, "%02d:%02d", now.hour(), now.minute());

  // extrai as informações de forma individual
  int dia = now.day();
  int mes = now.month();
  int anio = now.year();
  int hora = now.hour();
  int minuto = now.minute();
  int segundo = now.second();
  String strone = "data:";
  String strtwo = strone+dia+"/"+mes+"/"+anio;
  String strthree = ";hora:";
  String strfour = strtwo+strthree+hora+"."+minuto+"."+segundo;

  //Lee as balanças
  float WeightA = (balanzaA.get_units(10));
  WeightA=WeightA*1000;
  float WeightB = (balanzaB.get_units(10));
  WeightB=WeightB*1000;
  /*

  */
  String stringBalA = "PA;" + String (WeightA,2);
  String stringBalB = "PB;" + String (WeightB,2);
  // String stringBalC = "PC;" + String (WeightC,2);

  // Ciclo de detecção para alarmes balança 1
  if (WeightA<LimiteLowBal1){
    if (auxbal1){
      digitalWrite(OKBal1,LOW);
      auxbal1=!auxbal1;
    }
    else{
      digitalWrite(OKBal1,HIGH);
      auxbal1=!auxbal1;
    };
  }
}

```

```

else if (WeightA>LimiteHighBal1) {
    digitalWrite(OKBal1,LOW);
}
else {
    digitalWrite(OKBal1,HIGH);
};

// Ciclo de detecção para alarmes balança 2
if (WeightB<LimiteLowBal2) {
    if (auxbal2) {
        digitalWrite(OKBal2,LOW);
        auxbal2=!auxbal2;
    }
    else {
        digitalWrite(OKBal2,HIGH);
        auxbal2=!auxbal2;
    };
}
else if (WeightB>LimiteHighBal2) {
    digitalWrite(OKBal2,LOW);
}
else {
    digitalWrite(OKBal2,HIGH);
};

// Abre o arquivo .txt e somente um por vez (fechar antes de abrir outro)

// Ciclo de escrita a cada 10 minutos
if ( (minuto%10) == 0) { // Con este único if entrará cada dez minutos. Os demais sobrarão.
    if (!guardado) { // se não se tem guardado ainda
        File dataFile = SD.open("datalogg.txt", FILE_WRITE);
        dataFile.print(strfour);
        dataFile.print(stringBalA);
        dataFile.println(stringBalB);
        // dataFile.println(stringBalC);
        dataFile.close();
        // apresenta dados também no monitor serial
        //Serial.print(strfour);
        //Serial.print(stringBalA);
        //Serial.println(stringBalB);
        // Serial.println(stringBalC);

        guardado=true; // "desmontamos" o guardado para que não entre mais
    }
}
else { // se o minuto deixa de ser o de guardado
    guardado = false; // "armamos" de novo o guardado para a seguinte ocasião
};

// Formato de mostrar a data no display
//A0000-12-D010619
//B0000-12-H20:23

// Imprime as medições
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("A");
lcd.setCursor(1, 0);
lcd.print(WeightA);
lcd.setCursor(8, 0);
lcd.print("g");
lcd.setCursor(10, 0);
lcd.print("D");
lcd.setCursor(11, 0);
lcd.print(bufferFecha);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("B");
lcd.setCursor(1, 1);
lcd.print(WeightB);
lcd.setCursor(8, 1);

```

```
lcd.print("g");  
lcd.setCursor(10, 1);  
lcd.print("H");  
lcd.setCursor(11, 1);  
lcd.print(bufferHora);  
//Atualiza monitor a cada segundo  
delay (1000);  
};  
/*  
// FIM
```