

FLÁVIO BASTOS CAMPOS

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADA COM USO DE POLÍMEROS  
HIDRORETENTORES NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE TOMATE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C198m  
2017 Campos, Flávio Bastos, 1987-  
Manejo da irrigação automatizada com uso de polímeros  
hidroretentores na produção de mudas de tomate / Flávio Bastos  
Campos. – Viçosa, MG, 2017.  
xiv, 90 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 65-68.

1. Irrigação por aspersores. 2. Coloides. 3. Tomate - Mudas - Qualidade. 4. Estufas para cultivo. 5. Evapotranspiração. 6. Tomate - Mudas - Necessidades de água. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.587

FLÁVIO BASTOS CAMPOS

MANEJO DA IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADA COM USO DE POLÍMEROS  
HIDRORETENTORES NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE TOMATE

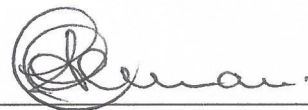
Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, para  
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de dezembro de 2017.



---

Edvaldo Fialho dos Reis



---

Catariny Cabral Aleman



---

Everardo Chartuni Mantovani  
(Orientador)

“If you want you cannot take it from me  
If you think you can, you still don't know me  
Let me tell you, when I said it, I meant it  
And I will always have the right to defend it”

All Hope is Gone, Slipknot (2008)

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Maria Emília e André por mais de 30 anos de acompanhamento e torcida;

À Iara, sempre bro, Schwester, soeur e irmã;

À Vó Dinorah por todo suporte e incentivo;

À Fabiana, minha noiva, pelo carinho e por todos os sonhos compartilhados;

Ao Professor Everardo C. Mantovani por me acolher no grupo, pela orientação, pela praticidade e discussões críticas;

À Professora Catariny C. Aleman pelas muitas oportunidades e trabalho em parceria;

Ao Professor Sérgio Zolnier pela paciência e aconselhamento;

À UFV por propiciar uma formação acadêmica digna;

Ao GESAI, palco de oportunidades em todos os níveis;

Ao Professor Fernando F. da Cunha pelas muitas contribuições;

Ao Núcleo de Extensão do GESAI e sua audácia;

A Lucas Borges, Edcássio, Jeffeson Mesquita e Vinícius Oliveira: nerds de plantão;

Ao Matheus Caliman por participar do projeto;

Ao Michael Canesche e Fernando Passe pela participação no desenvolvimento dos programas computacionais nas fases 1 e 2 do experimento, respectivamente;

À Mariana Campello, Mariana Baía, Déborah Freitas, Igor Boninsenha e Lucas Maurício pela força;

Ao Lucas “Bahiano” por abraçar o projeto, presencialmente e à distância;

À Maria Clara por toda ajuda e profissionalismo;

Aos Professores Weyder Santana e Og de Souza pelas contribuições na minha formação acadêmica e pela amizade;

Ao Professor Paulo Roberto Cecon, Conselheiro Estatístico deste trabalho;

Ao Professor Silvio Bueno Pereira pelo acesso às instalações e material do Laboratório de Física do Solo da Hidráulica, à Professora Herminia Emilia Prieto Martinez pela concessão da casa de vegetação para a condução do experimento, ao Professor Derly José Henriques da Silva pelas ousadas discussões sobre a condução de tomateiros, ao Professor Ricardo dos Santos Ferreira pelo incentivo a trabalhar com Arduino, ao Professor Raphael Bragança Alves Fernandes pelas discussões acerca de física de substratos;

A Dilson, Gilberto e Professor Márcio Aredes pela contribuição de infraestrutura;  
Ao Rogério e toda equipe da SEMEARTE pela enorme ajuda neste projeto;  
Ao João Vítor Toledo e ao Carlos Ferenc pela ajuda em momentos técnicos críticos;  
Aos técnicos Luiz Sérgio, Chicão e Policarpo pela boa vontade e suporte;  
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado;  
Aos Professores Catariny C. Aleman e Everardo C. Mantovani e ao GESAI pelos recursos financeiros relacionados ao projeto;  
A todos outros membros desta grande equipe que, por algum descuido meu, não foram diretamente mencionados.

## CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2.1. Objetivos específicos .....</b>	<b>3</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Aspectos gerais .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.1. Localização e datas.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.2. Casa de vegetação e sistema de cultivo.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1.3. Semeadura, plantio, cultivo e tratos culturais .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.4. O substrato e o hidrogel.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.5. O sistema de irrigação .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.6. Evapotranspiração de referência.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.7. Balanço de radiação na casa de vegetação.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2. Fase 1.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.1. Avaliação do sistema.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.2. Sistema de aquisição de dados meteorológicos .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.3. Manejo da irrigação.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.4. Definição dos tratamentos .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.5. Determinação do coeficiente de cultura (Kc).....</b>	<b>23</b>
<b>3.3. Fase 2.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1. Avaliação do sistema.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2. Sistema de aquisição de dados meteorológicos .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.3. Sensor de temperatura do ar e umidade do ar .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.4. Sensor de radiação solar .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.5. Calibração dos sensores e testes do programa .....</b>	<b>30</b>

3.3.6.	Testes do programa.....	30
3.3.7.	Manejo da irrigação.....	30
3.3.8.	Definição dos tratamentos.....	32
3.3.9.	Variáveis e índices analisados.....	33
3.3.10.	Análise estatística.....	36
4.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>38</b>
4.1.	Fase 1.....	38
4.1.1.	Avaliação do sistema de irrigação.....	38
4.1.2.	Obtenção do coeficiente de cultura ( <i>Kc</i> ).....	38
4.2.	Fase 2.....	39
4.2.1.	Avaliação do sistema de irrigação.....	39
4.2.2.	Água Retida no Substrato ( <i>ARS</i> ) e Déficit Máximo Permitido ( <i>DMP</i> )... 40	40
4.2.3.	Microclima na casa de vegetação.....	40
4.2.4.	Balço hídrico.....	42
4.2.5.	Avaliações morfológicas.....	46
5.	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
6.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXO A: Calibração do piranômetro (PY42792).....</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXO B: Calibração do sensor de temperatura do ar (DHT22).....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO C: Resumo das Análises de Variância de variáveis e índices estudados neste trabalho.....</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXO D: Modelos de regressão ajustados para as variáveis estudadas neste trabalho.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO E: Código fonte do programa utilizado na Fase 1 do trabalho.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO F: Código fonte do programa utilizado na Fase 2 do trabalho.....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estrutura experimental montada no interior da casa de vegetação.....	12
<b>Figura 2:</b> Vista frontal da casa de vegetação.....	13
<b>Figura 3:</b> Estrutura da Fase 1. Mesas metálicas, bandejas suspensas apoiadas sobre arame.....	14
<b>Figura 4:</b> Estrutura da Fase 2. Mesas metálicas, bandejas suspensas apoiadas sobre ripas de madeira.....	14
<b>Figura 5:</b> A: Caixas d'água com nível controlado por bóia. B: Manômetro posicionado após o filtro. C - Filtro de discos posicionado após a bomba. D - Montagem da bomba, filtro e entrada do manômetro.....	17
<b>Figura 6:</b> Esquerda: microaspersor de jato fixo 360, posicionado verticalmente para cima, atado à mesa metálica por abraçadeiras plásticas. Direita - superior: microaspersor posicionado no lado côncavo do aparador. Direita – inferior: encaixe do microtúbulos na mangueira de polietileno.....	18
<b>Figura 7:</b> Montagem com 4 emissores por bandeja, igualmente espaçados e posicionados próximos às quinas da bandeja.....	18
<b>Figura 8:</b> Bandeja sobre balança representando esquema da lisimetria de pesagem. ....	23
<b>Figura 9:</b> Esquema que representa o posicionamento dos coletores sobre a bandeja.....	25
<b>Figura 10:</b> Fluxograma do programa desenvolvido para a Fase 2 do experimento.....	27
<b>Figura 11:</b> Planilha eletrônica montada no M.O. Excel 2010 para sorteio de mudas a serem avaliadas.....	35
<b>Figura 12:</b> Caracterização do microclima (radiação global diária, temperaturas médias diárias do ar e umidades relativas médias diárias do ar) durante o ciclo de produção, da emergência até o 25° DAE.....	41
<b>Figura 13:</b> Caracterização do microclima (radiação global horária, temperatura média horária do ar, umidade relativa média horária do ar e evapotranspiração de	

referência média horária) durante o ciclo de produção, representadas ao longo das 24 horas.....	42
<b>Figura 14:</b> Balanço hídrico realizado pelo microcontrolador para os manejos <i>timer</i> (com e sem gel), $K_c$ (com gel; 1,55), $K_c$ (sem gel; 1,39), $0,50ET_o$ (com e sem gel), e $1,00ET_o$ (com e sem gel), durante os 25 dias do ciclo. ....	45
<b>Figura 15:</b> Valores observados médios e equações de regressão para Comprimento de Raiz, de todas as combinações Substrato x Manejo, ao longo do ciclo de muda.....	46
<b>Figura 16:</b> Valores observados médios e equações de regressão para Comprimento de Parte Aérea, de todas as combinações Substrato x Manejo, ao longo do ciclo de muda.....	48
<b>Figura 17:</b> Valores observados médios e equações de regressão para Massa Seca de Raiz, de todas as combinações Substrato x Manejo, ao longo do ciclo de muda.....	54
<b>Figura 18:</b> Valores observados médios e equações de regressão para Massa Seca de Parte Aérea, de todas as combinações Substrato x Manejo, ao longo do ciclo de muda.....	56
<b>Figura 19:</b> Curva de calibração do PY42792 com ajuste linear.....	69
<b>Figura 20:</b> Curva de calibração do DHT22 com ajuste linear para temperatura do ar.....	71

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Análise química de rotina do substrato utilizado em ambas as fases do experimento.....	15
<b>Tabela 2:</b> Resumo da descrição dos 2 tratamentos experimentais da Fase 1 .....	23
<b>Tabela 3:</b> Resumo da descrição dos 8 tratamentos experimentais da Fase 2 .....	32
<b>Tabela 4:</b> Valores médios de $K_c$ obtidos por lisimetria de pesagem na Fase 1 do experimento.....	38
<b>Tabela 5:</b> Avaliação do sistema de irrigação: Uniformidade média estimada de distribuição da água ( $CUC$ ), eficiência estimada de irrigação ( $\varepsilon_i$ ) e Intensidade de Aplicação estimada de água ( $IA$ ) no sistema. ....	39
<b>Tabela 6:</b> Número médio de irrigações realizadas ( $\bar{N}_{irr}$ ), tempo médio de duração da irrigação ( $\bar{T}_{irr}$ ) e lâmina líquida total aplicada ( $L_{irr}$ ).....	44
<b>Tabela 7:</b> Valores médios de $L_r$ – Comprimento radicular (cm). ....	47
<b>Tabela 8:</b> Valores médios de $L_{pa}$ – Comprimento de Parte Aérea (cm).....	49
<b>Tabela 9:</b> Valores médios de $DC$ para as respectivas combinações de Manejos e de Substratos .....	52
<b>Tabela 10:</b> Valores médios de $RPADC$ para as respectivas combinações de Manejos e de Substratos .....	54
<b>Tabela 11:</b> Valores médios de $MS_r$ – Massa da Matéria Seca Vegetal do Sistema Radicular (g).....	55
<b>Tabela 12:</b> Valores médios de $MS_{pa}$ – Massa da Matéria Seca Vegetal de Parte Aérea (g).....	57
<b>Tabela 13:</b> Valores médios de $Ap$ para os diferentes níveis de substrato.....	59

<b>Tabela 14:</b> Valores médios $TPMS_r$ , $TPMS_{pa}$ e $TPMS_t$ , em $(g\ m^{-2}\ dia^{-1})$ , para os diferentes níveis de substrato.....	60
<b>Tabela 15:</b> Valores médios de $TCR_r$ , $TCR_{pa}$ e $TCR_t$ , em $mg\ dia^{-1}$ , para os diferentes de manejos de irrigação.....	61
<b>Tabela 16:</b> Valores médios de $TCR_r$ , $TCR_{pa}$ e $TCR_t$ , em $mg\ dia^{-1}$ , para os diferentes níveis de substratos.....	61
<b>Tabela 17:</b> Resumo da Análise de Variância das variáveis $L_r$ e $L_{pa}$ .....	72
<b>Tabela 18:</b> Resumo da Análise de Variância da variável DC e do índice RPADC.....	72
<b>Tabela 19:</b> Resumo da Análise de Variância da variável Ap e dos índices $TPMS_r$ , $TPMS_{pa}$ e $TPMS_t$ .....	72
<b>Tabela 20:</b> Resumo da Análise de Variância das variáveis $MS_r$ e $MS_{pa}$ .....	73
<b>Tabela 21:</b> Resumo da Análise de Variância dos índices $TCR_r$ , $TCR_{pa}$ e $TCR_t$ .....	73
<b>Tabela 22:</b> Modelos de regressão para $L_r$ – Comprimento radicular (cm).....	74
<b>Tabela 23:</b> Modelos de regressão para $L_{pa}$ – Comprimento de Parte Aérea (cm).....	74
<b>Tabela 24:</b> Modelos de regressão para $MS_r$ – Massa da Matéria Seca Vegetal do Sistema Radicular (g).....	75
<b>Tabela 25:</b> Modelos de regressão para $MS_{pa}$ – Massa da Matéria Seca Vegetal de Parte Aérea (g).....	75

## RESUMO

CAMPOS, Flávio Bastos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2017. **Manejo da irrigação automatizada com uso de polímeros hidroretentores na produção de mudas de tomate.** Orientador: Everardo Chartuni Mantovani.

A etapa de produção de mudas é um ponto crítico do sistema de produção de hortaliças. Mudas são muito sensíveis às condições bióticas e abióticas e exigem mais cuidados. A obtenção de mudas de alta qualidade é um pré-requisito para que as fases seguintes da cultura ocorram bem e haja otimização da produtividade. A qualidade das mudas está diretamente associada aos manejos aos quais as mudas foram submetidas. Dentre as várias práticas culturais importantes ao cultivo de mudas está o manejo da água. A prática da irrigação é indispensável e exige um sistema de irrigação de qualidade, devidamente ajustado, juntamente com um plano de gestão da água específico para atender à demanda hídrica da cultura. O manejo da irrigação na condução de mudas carece de muitas informações específicas, principalmente quando envolve o uso de insumos como polímeros hidroretentores (hidrogéis) e tecnologias de automação do sistema de aquisição de dados e de irrigação. Buscando mais informações acerca da gestão da água neste cenário de produção, estudos foram conduzidos em casa de vegetação na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. Foram produzidas mudas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) em bandejas plásticas de 128 células, suspensas a 1,25 m do chão. As mudas foram irrigadas por 4 microaspersores de jato fixo 360° por bandeja, devidamente isolada por aparadores, seguindo metodologia desenvolvida para este trabalho. Durante a Fase 1, em janeiro/fevereiro de 2017 (duração de 24 dias), o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) das mudas cultivadas na presença e ausência de hidrogel foi avaliado por lisimetria de pesagem. Na Fase 2, setembro de 2017 (duração de 25 dias), as mudas foram submetidas a 4 manejos de irrigação ( $K_c$ , *timer*,  $0,50 ETo$  e  $1,00 ETo$ ), na presença e ausência de hidrogel e então avaliadas em relação a parâmetros de qualidade. O microclima no interior da casa de vegetação foi monitorado com uso de sensores de temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação global conectados a um microcontrolador que executou cálculos horários de evapotranspiração de referência pelo método padrão de Penman – Monteith FAO56 modificado para o balanço de ondas longas segundo Walker, Aldrich, Short (1983), e conduziu o balanço hídrico e a tomada de decisão de irrigação para cada tratamento

modificado para o balanço de ondas longas segundo Walker, Aldrich, Short (1983), e conduziu o balanço hídrico e a tomada de decisão de irrigação para cada tratamento experimental. O  $K_c$  de mudas cultivadas em substrato com hidrogel (1,55) foi maior que o  $K_c$  em substrato puro (1,39). O uso do hidrogel foi um diferencial para produção de mudas de tomate mais precoces, com maior altura final, maior diâmetro de colo, maior acúmulo de massa seca de parte aérea, maior área de projeção da copa e maior a Taxa de Crescimento Relativo de parte aérea. No sistema radicular o hidrogel favoreceu o acúmulo de massa seca radicular por meio do desenvolvimento de raízes adventícias. Os manejos de irrigação aplicados não influenciaram as mudas produzidas sem hidrogel. Na presença do hidrogel o manejo  $0,50 ETo$  favoreceu mudas mais altas, com colo mais fino e menor massa seca de parte aérea. O manejo  $1,00 ETo$  promoveu maior Taxa de Crescimento Relativo de parte aérea. Os manejos  $K_c$  e  $timer$  não apresentaram influência na qualidade das mudas.

## ABSTRACT

CAMPOS, Flávio Bastos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2017. **Automated irrigation management with hydrophilic polymers usage in tomato seedlings production.** Advisor: Everardo Chartuni Mantovani.

The seedling production phase is a critical point in the horticultural production system. Seedlings are very sensitive to biotic and abiotic conditions and require more caution. Seedlings quality is straightly associated to the management which the seedlings were submitted to. Among several important seedlings crop practices is water management. Irrigation practice is indispensable and it requires a properly fit quality irrigation system, together with a specific water management plan to meet the crop's water demand. Irrigation management in seedling cultivation lacks many specific information, especially when it involves the use of inputs such as hydrophilic polymers (hydrogels) and data acquisition and irrigation system automation technologies. Looking for more information on water management in this production scenario, studies were conducted in a greenhouse at the Federal University of Viçosa, Viçosa – MG. Tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum* Mill) were produced in 128 cell plastic trays, suspended at 1.25 m above the ground. The seedlings were irrigated by 4 360° fixed jet microsprinklers per tray, duly isolated by shields, according to the methodology developed for this work. During Phase 1, in January/February 2017 (lasting 24 days), the crop coefficient ( $K_c$ ) of seedlings in the presence and absence of hydrogel was evaluated by weighing lysimetry. In Phase 2, September 2017 (lasting 25 days), the seedlings were submitted to 4 irrigation managements ( $K_c$ , timer, 0.50  $ET_0$  and 1.00  $ET_0$ ), in the presence and absence of hydrogel and then they were evaluated in according to seedlings quality parameters. The greenhouse microclimate was monitored using air temperature, relative humidity and global radiation sensors, all connected to a microcontroller which performed hourly reference evapotranspiration calculations using the standard Penman – Monteith FAO56 method modified for long – wave balance according to Walker, Aldrich, Short (1983), and it performed the water balance and also the irrigation decision – making for each experimental treatment. The  $K_c$  coefficient for seedlings cultivated on substrate with hydrogel (1.55) was higher than  $K_c$  of those on pure substrate (1.39). The hydrogel usage was a differential for the obtaining earlier tomato seedlings, with higher final height, larger

higher than  $K_c$  of those on pure substrate (1.39). The hydrogel usage was a differential for the obtaining earlier tomato seedlings, with higher final height, larger stem diameter, greater shoot dry mass accumulation, greater shoot projected area and higher shoot Relative Growth Rate. Hydrogel presence favored the root system dry mass accumulation by adventitious roots development. The applied irrigation managements did not influence seedlings produced with no hydrogel. In hydrogel presence, the *0.50 ETo* management favored higher seedlings, with thinner stem and lower shoot dry mass. The *1.00 ETo* management promoted a higher shoot Relative Growth Rate. The  $K_c$  and *timer* managements had no influence on seedlings quality.

# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1. Introdução

No processo de produção de hortaliças como um todo, a etapa de produção de mudas é uma das mais importantes, pois mudas de boa qualidade possibilitam que as plantas expressem seu potencial genético e influenciam diretamente na produtividade (REGHIN et al., 2007).

Os ambientes de produção de mudas em casas de vegetação geralmente abrigam culturas diferentes e o manejo da cultura é simplificado como um manejo único em função das dificuldades práticas de se aplicar manejos diferenciados, principalmente para o manejo da água.

Essas dificuldades constituem um cenário que pode comprometer a atividade devido a menores lucros líquidos por excesso de água aplicada e de energia utilizada, além da perda de adubos por lixiviação, surgimento de doenças, perda na qualidade fisiológica e morfológica das mudas.

Ter hortaliças com grande potencial produtivo em campo depende de diversos fatores e um deles é o plantio de mudas de qualidade (GUPTA; SAMUEL; SIROHI, 2010). O manejo da cultura, por sua vez, constitui uma peça chave para o sucesso de um empreendimento ou projeto.

O manejo da água em um sistema de produção visa oferecer às plantas a quantidade suficiente de água, nos melhores momentos, de maneira viável. Por isso é muito importante conhecer as relações entre o solo ou substrato, a água, a planta e a atmosfera, atuantes nas condições do sistema em questão, uma vez que tais informações são essenciais para se estimar a necessidade hídrica da cultura. Assim, é fundamental dispor de um sistema de irrigação de qualidade, adequado ao projeto e que possa ser regulado para atender ao manejo desejado sem perder eficiência de irrigação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A horticultura é um mercado forte no Brasil e a produção de mudas para o setor é um ponto fraco do sistema produtivo. Há necessidade de estudos mais específicos nesta, preenchendo lacunas no manejo de mudas.

Nas últimas décadas, alguns insumos, como os hidrogéis, ganharam interesse na agricultura com o objetivo de melhorar os índices de produtividade. Os hidrogéis são polímeros hidroretentores que, misturados ao solo ou substrato, podem

alterar as suas propriedades físicas e químicas, influenciando a retenção de água e a dinâmica de seus nutrientes.

O uso de condicionadores de solo altera as relações entre o solo ou substrato, a água, a planta e a atmosfera modificando o manejo da água no sistema. Com a possibilidade de proporcionar maior segurança hídrica à cultura, maior eficiência no uso da água e maior qualidade em mudas de hortaliças, estas relações carecem de estudos acerca das melhorias quantitativas que poderiam ser alcançadas.

De maneira análoga, os sistemas de irrigação utilizados em sistemas de produção de mudas deixam a desejar. Para a produção de mudas no sistema de bandejas suspensas, geralmente a irrigação é feita manualmente com regadores ou mangueiras, ou com aspersores que não permitem regulagem adequada para boa eficiência de irrigação.

O manejo de irrigação criterioso, proposto para atender à demanda hídrica da cultura, pode requisitar dados meteorológicos, cálculos matemáticos e comandos “liga” e “desliga” com grande frequência, em horários e condições de trabalho que podem se incompatíveis com o trabalho manual. Assim, existe a necessidade de automação do sistema. Não somente do sistema de irrigação em si, mas também do sistema de aquisição de dados e processamento da demanda hídrica da cultura.

Tecnologias para automação destes sistemas estão disponíveis no mercado de diversas formas, por diversas empresas, da mesma forma como as metodologias para auxílio das tomadas de decisões na irrigação são estudadas na ciência. O que pouco se encontra são informações mais precisas sobre os efeitos de aplicar estas metodologias de maneira automatizada com este insumo potencial na qualidade das mudas produzidas.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo foi desenvolver e implementar um sistema de irrigação localizada automatizado capaz de detectar o microclima em casa de vegetação e aplicar lâminas de irrigação estimadas com os dados *in locus*, para produção de mudas de tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill) cultivadas em bandejas com substrato, na ausência e presença de gel hidrorretentor.

### 1.2.1. Objetivos específicos

- Determinar o Coeficiente de Cultura ( $K_c$ ) para a fase de muda de tomateiro cultivadas em bandejas suspensas com substrato comercial, na presença e ausência de gel hidrotentor;
- Desenvolver e implementar um sistema automatizado via Arduino para monitoramento do microclima da casa de vegetação (Temperatura do ar, Umidade Relativa do ar e Radiação Solar) e tomada de decisão de irrigação com base na estimativa evapotranspirométrica horária por Penman-Monteith FAO56;
- Testar e validar o sistema automatizado para quatro diferentes estratégias de manejo de irrigação de mudas de tomateiro;
- Avaliar presença de gel hidrotentor incorporado ao substrato na qualidade das mudas de tomateiro produzidas;
- Avaliar o efeito de quatro diferentes estratégias de manejo de irrigação na qualidade das mudas de tomateiro produzidas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Os ambientes de produção de mudas em casas de vegetação geralmente abrigam culturas diferentes e seu manejo, na prática, é simplificado como um manejo único. Por exemplo, para a irrigação, produtores tendem a adotar a quantidade de água aplicada, via tempo de irrigação, baseando-se nas culturas mais sensíveis ao déficit hídrico. Para a nutrição, de maneira análoga, a fertilização dos substratos e a aplicação via fertirrigação muitas vezes é indiferenciada para culturas diferentes.

A produção em ambientes protegidos ou casas de vegetação é uma importante alternativa para produtores de mudas de hortaliças, ornamentais, medicinais, aromáticas e outras. Estes ambientes facilitam o controle dos fatores bióticos e abióticos, como exemplos, evitam geadas diretamente na cultura, precipitações e radiação excessivas, diminuem os efeitos dos ventos, aumentam as eficiências para aplicação de produtos defensivos, possibilitam ter um controle - mínimo que seja - da temperatura do ar e facilitam as práticas de irrigação, fertirrigação e de controle de plantas espontâneas. Desta forma podem-se ter estandes mais uniformes e possibilitar um produto de melhor qualidade, com as características desejadas (REGHIN *et al.*, 2007).

Em comparação ao sistema de produção das mudas “a campo”, as mudas em casas de vegetação atingem o ponto de transplântio mais cedo, diminuindo custos de produção e permite planejar a produção de mudas visando obtê-las na época exata necessária (GUPTA; SAMUEL; SIROHI, 2010).

Na produção de mudas em casas de vegetação geralmente usa-se bandejas preenchidas com substrato. O cultivo nas bandejas apresenta vantagens, como a possibilidade de que sejam dispensados cuidados maiores às mudas, em relação aos sistemas de sementeiras ou semeadura direta. Sistemas de sementeiras geralmente apresentam maior taxa de descarte de mudas, enquanto que sistemas em bandejas proporcionam maior aproveitamento das mudas e menor gasto com sementes (REGHIN *et al.*, 2007).

Neste sistema as plântulas sofrem menor estresse por competição entre si em comparação com sementeiras e com a semeadura direta seguida de desbaste. Além disso, o sistema radicular é preservado durante o transplântio. É uma prática considerada muito importante para prevenção de doenças radiculares (REGHIN *et al.*, 2007). Considera-se também a praticidade da produção em maiores escalas,

transporte e comercialização de mudas que são viabilizados pelo uso de bandejas. Por essas consequências, este sistema é mais usado.

A gestão da água na agricultura irrigada não remete somente ao controle da água no sistema de produção, mas envolve conhecer tanto o solo ou substrato e suas características físicas, como conhecer as variáveis climáticas que estão diretamente ligadas à produção vegetal como temperatura do ar, umidade relativa do ar e a radiação solar incidente, estimando assim as taxas evapotranspirativas no ambiente de produção. O manejo da água envolve também conhecer o comportamento do sistema de irrigação utilizado. Desta forma pode-se determinar o momento mais adequado, de qual forma e a quantidade de água a ser fornecida para a cultura (GUPTA; SAMUEL; SIROHI, 2010).

Muitas vezes, na prática, os sistemas de produção não operam sob manejo eficiente, não por falta de tecnologia ou de capital, mas porque as decisões são tomadas de maneira improvisada, aleatória, descuidada ou de maneira subjetiva pelo produtor; mesmo quando embasadas em experiência de campo, são passíveis de maiores divergências, causando ambientes desfavoráveis para o desenvolvimento das mudas e o surgimento de doenças e outros estresses.

Os históricos de diversas regiões produtoras mostram que há consumo exagerado de água e fertilizantes na produção em casas de vegetação. Em grande parte dos sistemas de produção comercial de mudas não há critérios satisfatórios para manejo da irrigação. Constitui-se um cenário com menores lucros líquidos devido ao excesso de água, de energia e perda de adubos por lixiviação (GUPTA; SAMUEL; SIROHI, 2010).

A proposta do manejo da irrigação de um ambiente de produção vegetal deve ser elaborada de forma que apresente eficiência em relação ao uso da água, que sigam modelos ou metodologias adequadas para determinação das lâminas aplicadas, mas que também seja aplicável em ambientes de produção comercial. Para isso, são necessários instrumentos e metodologias para auxílio das tomadas de decisões.

O manejo da irrigação em sistemas de produção de hortaliças, condimentares, medicinais e ornamentais em bandejas e vasos é de grande dificuldade. Trata-se de um desafio pelo fato da quantidade de água retida no substrato, em restrito volume de substrato, que esteja disponível às raízes é pequena, sendo necessárias diversas irrigações diárias (CHAPPELL *et al.*, 2013). Além disso, cada evento de irrigação requer uma pequena lâmina aplicada para que não haja

percolação e “lavagem” de nutrientes, tampouco escoamento superficial nos vasos e bandejas.

O uso de bandejas para produção de mudas está diretamente relacionado ao manejo da irrigação e da nutrição. Há diversos estudos envolvendo estas questões neste meio de produção, abrangendo volume de substrato, número de células, tipos de substratos, lâminas de irrigação aplicadas; tudo influencia em relação ao manejo da irrigação e aplicação de fertilizantes (CERQUEIRA *et al.*, 2015; DA SILVA *et al.*, 2014; INCROCCI *et al.*, 2014).

A escolha do substrato é importante, pois sua composição determinará a retenção da água, definindo o que se refere comumente como “caixa d’água disponível à planta”. Substratos que retêm pouca água definem caixas d’água pequenas, e o manejo de água deve se ajustar em maior número de eventos de irrigação, cada um com menor lâmina aplicada. A aplicação de nutrientes pós-semeadura é feita via água de irrigação, portanto o manejo nutricional está atrelado ao manejo da irrigação, sendo também determinado pelas características do substrato (LONDRA; PARASKEVOPOULOU; PSYCHOYOU, 2012; TRAZZI *et al.*, 2012).

O número de células das bandejas está relacionado ao volume de cada célula de maneira inversa. Assim, bandejas com 72 células têm células de maior volume que as de 128, 200 e 288 células. Geralmente as bandejas com maiores células oferecem maior segurança ao produtor, no sentido de possuir maior volume de substrato e reduzir o risco de ocorrência de estresse hídrico em casos de manejo mal conduzido, justamente por constituírem maior caixa d’água. O mesmo raciocínio se aplica para a nutrição das mudas (CERQUEIRA *et al.*, 2015; COSTA *et al.*, 2011, 2012; REGHIN *et al.*, 2007). Porém, podem apresentar menor viabilidade à produção, pois utilizam o mesmo espaço nas bancadas, gastam maior quantidade de substrato por muda e retornam menos mudas por bandeja.

Outra variável que influencia diretamente no manejo é a eficiência da irrigação do sistema, e esta depende de muitos fatores. O posicionamento das bandejas é um deles, pois devem ser dispostas horizontalmente e preferencialmente sem espaços entre bandejas. Assim perde-se menos água por espaços vazios. Outra consequência disto é a diminuição do efeito de borda na bandeja, resultando em menores diferenças das condições às quais as mudas das bordas estão sujeitas em relação às do centro das bandejas (condições microclimáticas como umidade relativa do ar, fluxo de ar por entre bandejas e sombreamento de mudas vizinhas) resultando

em mudas mais uniformes em relação ao desenvolvimento das partes aérea e radicular (GERVÁSIO; FRIZZONE, 2004; MELO JÚNIOR *et al.*, 2015).

O manejo da irrigação tem o objetivo de disponibilizar à cultura as quantidades ideais de água, nos momentos ideais, da melhor forma possível. Em situações onde não se deseja impor nenhum déficit hídrico e tampouco estabelecer perdas por excesso, essa quantidade ideal de água a ser disponibilizada corresponde às perdas de água do sistema solo + planta para a atmosfera, englobando os processos de evaporação e de transpiração. Ambos os processos somados definem a evapotranspiração da cultura (ETc) (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A ETc pode ser estimada por diversos modelos empíricos. Pode também ser obtida experimentalmente a partir do balanço hídrico em tanques evaporativos, como o Tanque Classe A (DOORENBOS; PRUITT, 1977; SNYDER, 1992) ou em lisímetros. Estes são estruturas (montagens experimentais) capazes de medir pequenas variações em massa (lisímetro de pesagem) ou em volume (lisímetro de drenagem ou percolação) de um container cultivado. Estas variações de peso ou de volume são associadas à entrada e à saída de água do sistema, e por meio do balanço hídrico – conhecendo-se a lâmina irrigada, precipitada e drenada – consegue-se saber um valor quantitativo para a ETc (ALLEN *et al.*, 1998).

Dentre os modelos empíricos o mais utilizado é a equação de Coeficiente de Cultura Simples, também conhecida como modelo FAO24, que relaciona ETc com a ETo por um único coeficiente de cultura (Kc), sugerida no Boletim FAO24 e reforçada no Boletim FAO56 (ALLEN *et al.*, 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Esta equação deve ser aplicada em situações de planejamento de sistemas de irrigação, de seus manejos e rotinas básicas de irrigação e até mesmo para aplicações em tempo real de lâminas de irrigação. O modelo FAO24 pode ser usado para determinar a evapotranspiração em bases de tempo de um dia ou mais (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O coeficiente Kc carrega em si as influências do solo (física e química do solo, destacando a influência do conteúdo de água do solo na ETc), da planta (fase de desenvolvimento, características genéticas, estado nutricional, condições fitossanitárias). Trata-se de um parâmetro que ajusta as perdas nas condições climáticas do local (ETo) às perdas da cultura nas condições climáticas do mesmo local (ETc) pela razão ETc / ETo (ALLEN *et al.*, 1998).

O Boletim FAO56 traz compilações de diversos valores tabelados de  $K_c$ , reunidos a partir de trabalhos de campo, como valores referenciais. Porém esses valores podem mudar bastante quando mudam as condições do meio e em função de características específicas da planta. As tabelas da FAO trazem valores médios, que podem ter sido gerados para diferentes regiões, com diferentes sistemas de irrigação, diferentes frequências de molhamento, com dados de diferentes cultivares, sob diferentes manejos nutricionais e influenciados por diferentes estímulos microclimáticos. Estes fatores, entre outros, influenciam na abertura e fechamento estomático, este influencia o desenvolvimento das plantas (comprimento de parte aérea, comprimento radicular, número de folhas, brotações laterais, ângulo de interceptação luminosa e outros parâmetros) (ABEDINPOUR, 2015; ALLEN *et al.*, 1998). Enfim, mesmo que sejam consideradas plantas da mesma espécie, têm-se plantas com fenótipos diferentes e demandas hídricas diferentes, mesmo que tenham a mesma idade em dias.

Estes valores são recomendados para condições diversas, abrangendo muitas vezes faixas de valores mais amplas ou com desvio grande em relação ao  $K_c$  real de um sistema de plantio (ABEDINPOUR, 2015). Por esses motivos valores de  $K_c$  têm sido considerados muito importantes e constantemente estudados desde a década de 70, para novas culturas ou como ajustes locais (ALLEN *et al.*, 1998). Portanto, conhecer os valores de  $K_c$  de uma cultura com boa precisão, para condições específicas de cultivo, é aumentar grandemente as chances de estabelecer um bom manejo de irrigação.

As composições dos substratos encontrados no mercado variam entre fabricantes. Cada fabricante utiliza sua fonte de cada componente, e cada ingrediente é adicionado em proporções que, geralmente, não são reveladas. No processo produtivo, os ingredientes são homogeneizados em grande escala, gerando, portanto, lotes com sacas aceitas como iguais em composição. Os ingredientes utilizados, nas proporções usadas, conferem ao produto final (o substrato) um conjunto de características físicas e químicas particulares, acarretam certa “fertilidade inicial” e determinam a sua relação com a água.

A Disponibilidade Total de Água (DTA) é um parâmetro importante no manejo da irrigação, pois relaciona o conteúdo de água retido no solo/substrato na tensão de capacidade de campo com o conteúdo de água retido no solo/substrato na tensão de ponto de murcha permanente. Ou seja, DTA é o parâmetro que fornece a

quantidade de água estaria disponível às plantas, caso seus sistemas radiculares estejam presentes no volume de solo/substrato considerado, em condições de capacidade de campo. Esses dados são facilmente obtidos pela elaboração da curva de retenção do solo/substrato (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A DTA está relacionada, entre outros fatores, à porosidade (macroporosidade e microporosidade) do solo. A porosidade total está relacionada com o volume de água retido nas amostras saturadas. A microporosidade está relacionada à maior parte da água retida na matriz do solo (que está adsorvida nos microporos). Solos com maior proporção de partículas dos tamanhos silte e principalmente argila são geralmente os solos com maior microporosidade, tendem a ter maior DTA. Solos com maior macroporosidade tendem a apresentar boa drenagem, mas não necessariamente têm alta DTA. Estes solos têm maior proporção de partículas na fração areia (MARIA HELENA FERMINO, 2003).

Substratos podem ser compostos de materiais orgânicos diversos, materiais inorgânicos e solo. Alguns autores afirmam que o uso de solo na composição de substratos comerciais tem sido pouco nos últimos anos (LONDRA; PARASKEVOPOULOU; PSYCHOYOU, 2012). Entre os materiais orgânicos utilizados podem estar turfa, fibra de coco, resíduos vegetais degradados (compostagem), lodo de esgoto tratado, biosólidos, resíduos agroalimentares. Na fração inorgânica, materiais como vermiculita, areia e cascalho fino podem ser combinados com os materiais orgânicos (LONDRA; PARASKEVOPOULOU; PSYCHOYOU, 2012; MARTINS; BOVI; SPIERING, 2009).

A importância do substrato na produção de vegetal é destacável. Deve ser usado um substrato que proporcione o desenvolvimento otimizado das plantas, levando em consideração o crescimento e desenvolvimento radicular, boa retenção de água, boa aeração, boa densidade, boa CTC, boas condições fitossanitárias, ou seja, isenção de inóculos de plantas daninhas, de pragas e de doenças (LONDRA; PARASKEVOPOULOU; PSYCHOYOU, 2012).

O uso de polímeros hidrotentores (polímero hidrofílico, hidrogéis) começou a ser estudado na década de 50. Existem diversas aplicações para estes produtos, abrangidas por distintas áreas tecnológicas – recomendamos a revisão realizada por Ahmed (2015) sobre caracterização e aplicações dos hidrogéis.

Na agricultura, a maioria dos trabalhos visa aperfeiçoar sistemas de produção, pois é comum o estresse hídrico ser um dos fatores limitantes na

produtividade. O objetivo do uso destes condicionantes é, além de melhorar a qualidade dos produtos por meio do aumento da retenção de água no solo e simultaneamente do aumento da água disponível à planta, possibilita maiores intervalos entre irrigações, com menores lâminas aplicadas. Conseqüentemente, haverá aumento na eficiência do uso de água e redução dos custos com adubação, água e energia (FAGUNDES *et al.*, 2015; PREVEDELLO; LOYOLA, 2007; WOODHOUSE; JOHNSON, 1991).

A aplicação destes polímeros podem produzir resultados diferentes em função das propriedades físicas e químicas do solo, cultura e também das propriedades dos polímeros e suas doses aplicadas (ABEDI-KOUPAI; SOHRAB; SWARBRICK, 2008; GERVÁSIO; FRIZZONE, 2004; PREVEDELLO; LOYOLA, 2007).

Para condições em que os polímeros se encontram completamente hidratados, em meios argilosos, a taxa de infiltração pode ser reduzida em até 13 vezes, a depender da concentração do polímero (PREVEDELLO; LOYOLA, 2007).

A aplicação do gel modifica a porosidade do solo. Ocorre diminuição da macroporosidade que leva à diminuição da aeração do substrato, à diminuição da condutividade hidráulica e ao aumento de sua capacidade de retenção de água. Este efeito se dá pela expansão do polímero quando em contato com água (GERVÁSIO; FRIZZONE, 2004).

O uso destes condicionadores de solos vem sendo estudado nas últimas décadas para vários cultivos, também em campo, mas principalmente para a produção de mudas. Como exemplos, mudas de espécies florestais como pinhão-manso (BRASILEIRA *et al.*, 2013), em eucalipto (BUZETTO; BIZON; SEIXAS, 2002; LOPES *et al.*, 2010), em *Pinus sylvestris* (SARVAŠ; PAVLENDÁ; TAKÁCOVÁ, 2007), em diversas arbóreas nativas brasileiras (BARBOSA; RODRIGUES; COUTO, 2013), em grandes culturas como canola (TOHIDI-MOGHADAM *et al.*, 2009), milho e soja (GALEŞ *et al.*, 2016), em café (MARQUES; CRIPA; MARTINEZ, 2013), em fruticultura com mudas de maracujazeiro-amarelo (FAGUNDES *et al.*, 2015) e em hortaliças como em pimentão (ANGÉLICA; MARQUES; ORTENZI, 2010), em cenoura (OLSZEWSKI *et al.*, 2012), em alface (SANTOS *et al.*, 2015; WOODHOUSE; JOHNSON, 1991), em melão (DEMARTELAERE *et al.*, 2009) e em tomate (KUMARAN, 2016).

Com aumento da capacidade de retenção de água no substrato há melhoria no aproveitamento da água pelas plantas. Em mudas de hortaliças, foram registrados como resultados positivos da aplicação de polímeros hidroretentores melhor desenvolvimento das mudas de pimentão, com aumento da massa seca da parte aérea e de um maior número de folhas (MARQUES; BASTOS, 2010). Em meloeiro obteve-se melhorias na produtividade com redução do uso da água (DEMARTELAERE et al., 2009).

Em testes com germinação de cenoura houve melhoria do percentual germinativo com uso de hidrogel (OLSZEWSKI *et al.*, 2012). Em trabalhos com alface foi relatado aumento da produção de massa seca e melhoria na eficiência do uso da água pela cultura (SANTOS *et al.*, 2015; WOODHOUSE; JOHNSON, 1991). Em tomateiro foi observado, durante todo ciclo da cultura, maior altura nas plantas, aumento do número de ramos, comprimento do sistema radicular, peso seco radicular, peso dos frutos e produtividade de massa seca (KUMARAN, 2016).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Aspectos gerais**

##### **3.1.1. Localização e datas**

A pesquisa foi realizada no Campo Experimental Diogo Alves de Mello, localizado na Universidade Federal de Viçosa, município de Viçosa, MG. As coordenadas geográficas correspondentes são 20°46'04" S, 42°52'10" O, com altitude de 660 m, aproximadamente. O clima da região é do tipo "Cwa" (classificação de Köppen), caracterizado como clima temperado quente - mesotérmico, com chuvas no verão e inverno seco (STEIDLE NETO, 2007).

O trabalho foi composto por 2 fases experimentais nas quais a cultura cultivada foi tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Os períodos de cultivo foram de 23 de janeiro a 15 de fevereiro de 2017 (24 dias, Fase 1) e de 04 de setembro a 29 de setembro de 2017 (25 dias, Fase 2).

### 3.1.2. Casa de vegetação e sistema de cultivo

As mudas foram cultivadas em casa de vegetação não climatizada, orientada com a maior dimensão no sentido SE – NO, constituída por 3 módulos (Figura 2). O piso da casa de vegetação era de terra, coberto com brita. A cobertura, em formato tipo arco, é de polietileno de baixa densidade. As laterais dos 4 lados são fechadas com tela antiafídica. As laterais NE e NO possuem construções próximas (outras casas de vegetação) que influenciam reduzindo o vento que passa pela tela lateral. As laterais SE e SO (Figura 1) foram cobertas com um plástico translúcido para neutralizar os ventos nestas laterais.

A estrutura é metálica, pré-moldada, pé-direito de 4 m, com dimensões de 10 x 36, área total de 360 m<sup>2</sup>. A área ocupada pelo experimento foi de 144 m<sup>2</sup>, aproximadamente.

O experimento foi conduzido em sistema de bandejas suspensas (1,25 m acima do solo), dispostas sobre duas ripas de madeira, por sua vez apoiadas em mesas de estrutura metálica, conforme a foto da Figura 1.



**Figura 1:** Estrutura experimental montada no interior da casa de vegetação.



**Figura 2:** Vista frontal da casa de vegetação.

### **3.1.3. Semeadura, plantio, cultivo e tratos culturais**

A semeadura de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Santa Cruz Kada (Paulista) da empresa Isla foi realizada em bandejas, manualmente, de modo que cada célula recebeu somente uma semente, exceto por cada uma das fileiras longitudinais que receberam duas sementes por célula.

A fileira dupla tem finalidade de ceder plântulas a quaisquer células com problemas de germinação ou morte precoce de plântula. Até o 5º DAE as plântulas não utilizadas para repicagem foram descartadas, assim as bandejas permaneceram com uma plântula por célula.

As sementes foram depositadas considerando profundidade de plantio de  $6,0 \pm 2,0$  mm e em seguida cobertas com substrato e saturadas.

As bandejas plásticas utilizadas foram de 128 células (plástico escuro), com 0,26 m x 0,52 m, suspensas a 1,25 m do chão, suportadas por fios de arame (galvanizado, fio 10) esticados em estruturas metálicas recicladas na Fase 1 (Figura 3), e na Fase 2 o suporte foi com ripas de madeira, em substituição ao arame, dispostas sobre as mesmas estruturas metálicas (Figura 4).



**Figura 3:** Estrutura da Fase 1. Mesas metálicas, bandejas suspensas apoiadas sobre arame.



**Figura 4:** Estrutura da Fase 2. Mesas metálicas, bandejas suspensas apoiadas sobre ripas de madeira.

Foram realizadas aplicações preventivas de fungicida e inseticida em ambas as fases, assim como a realização de capinas manuais do solo da casa de vegetação.

Na Fase 2, especificamente no 13<sup>o</sup> DAE foi aplicado fertilizante solúvel Kristalon™Verde (18-18-18, Yara) em água, para todos os tratamentos experimentais, na dose de 3,0 g/L, com lâmina de aplicação de 2,0 mm, distribuídos manualmente com auxílio de uma piseta.

#### **3.1.4. O substrato e o hidrogel**

Foi utilizado o substrato comercial Carolina Padrão (Carolina Soil do Brasil; RS, Brasil) nas 2 fases do experimento.

Para quantificar a água retida no substrato (*ARS*) foi conduzido um teste em laboratório. Encheu-se 5 bandejas de substrato nas condições de umidade do pacote fechado. As bandejas foram pesadas em balanças (modelo Mark K12; TECNAL, SP, Brasil) com precisão de 0,1g. Em seguida foram saturadas com água à temperatura ambiente e esperou-se o tempo necessário para que, visualmente, as bandejas parassem de pingar. Então as bandejas foram pesadas novamente. A diferença de massas é o  $\Delta m_i$ . A partir da Eq. 01 calculou-se a *ARS*.

$$ARS = \frac{1}{A_b} \cdot \frac{1}{d_a} \cdot \sum_{i=1}^j \frac{\Delta m_i}{j} \quad (\text{Eq. 01})$$

*ARS* – Água Retida no Substrato (mm);

$A_b$  – área de uma bandeja,  $A_b = 0,1352 \text{ m}^2$ ;

$d_a$  – densidade da água,  $d_a = 1000 \text{ g/dm}^3$ ;

$j$  – número de bandejas pesadas,  $j = 5$ ;

$\Delta m_i$  – massa de água retida em cada bandeja amostrada, (g).

**Tabela 1:** Análise química de rotina do substrato utilizado em ambas as fases do experimento.

	<b>Ph</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	<b>Al<sup>+3</sup></b>
	H <sub>2</sub> O	mg/dm <sup>3</sup>			cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	
Substrato	6,4	26,1	152	7,5	13,4	0,0
Carolina						
Padrão	<b>H+Al</b>	<b>SB</b>	<b>CTC(t)</b>	<b>CTC(T)</b>	<b>V</b>	<b>m</b>
	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>					%
	4,0	21,3	21,3	25,3	84	0

**pH** em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> – relação 1:2,5; **P e K** – extrator Mehlich 1; **Ca, Mg, Al** – extrator KCl 1mol/L; **H+Al** – extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L – pH 7,0; **SB** – Soma de Bases trocáveis; **CTC(t)** – Capacidade de Troca Catiônica efetiva; **CTC(T)** – Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; **V** – índice de saturação de bases; **m** – índice de saturação de alumínio.

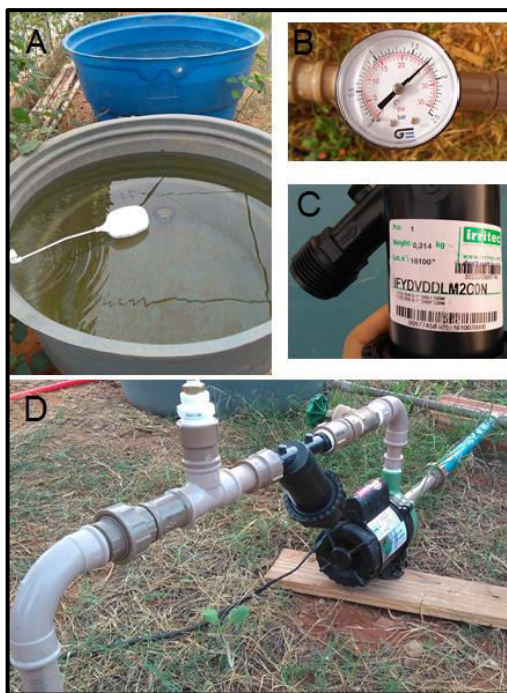
O hidrogel, ou polímero hidroretentor, utilizado no experimento foi o Hydroplan EB (Hydroplan) na dose de 5,3 g de gel por litro de substrato (dose indicada por SANTOS *et al.*, 2015 para a cultura da alface, testada em vasos). O gel foi preparado, seguindo as instruções no pacote do produto, aplicando

aproximadamente 14,0 litros de água em um balde que continha 74,2 g do gel em pó. Misturados até que o gel se homogeneizou. Em seguida adicionou-se 2,8 litros de substrato. Misturou-se até a homogeneização. Por fim foram adicionados 11,2 litros de substrato e misturou-se novamente até a homogeneização. Essa quantidade preparada é suficiente para encher 7 bandejas e ainda proceder a cobertura pós semente. Este preparo foi executado em ambas as fases.

### **3.1.5. O sistema de irrigação**

O sistema de irrigação foi a microaspersão. Foi montado utilizando duas caixas d'água de 500 litros de capacidade, cada uma, instaladas de maneira interligada, visando ter pelo menos dois dias de segurança em caso de falhas no serviço de distribuição de água. O abastecimento das caixas d'água foi feito continuamente pela rede de abastecimento de água, com controle de uma bóia.

Uma motobomba Schneider – monoestágio, centrífuga, 127 V, potência de 0,5 cv, (modelo BC-98; Schneider) – foi instalada de modo afogado e na sequência um filtro de discos em Y de 1” e 120 mesh (Y D 1” 120M; Irritec, CA, USA) e um manômetro GE com precisão de 0,05 bar (modelo CI 2.5, Genebre) conforme a Figura 5. Em seguida 2 registros de gaveta instalados para facilitar os ajustes da pressão nos emissores. E então as válvulas solenóides. Foi instalada uma válvula solenóide para cada tratamento experimental. Na saída de cada válvula solenóide havia um cano de PVC (40 mm, 6 m de comprimento) para cada tratamento experimental, e ao longo destes canos foram conectadas mangueiras de polietileno (12 mm de diâmetro nominal, plástico escuro). As conexões foram feitas com conectores, borracha de vedação, fita veda rosca e abraçadeiras metálicas. E nas mangueiras de polietileno foram ligados os microtúbulos e então os microaspersores.

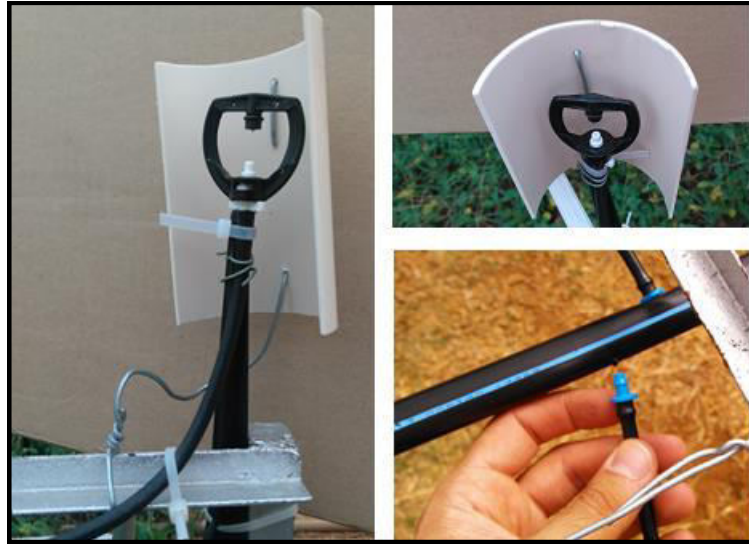


**Figura 5:** A: Caixas d'água com nível controlado por bóia. B: Manômetro posicionado após o filtro. C - Filtro de discos posicionado após a bomba. D - Montagem da bomba, filtro e entrada do manômetro.

Os microaspersores utilizados (modelo MF2; Amanco) foram montados em posição vertical com a cabeça para cima. Foram individualmente atados a estacas por abraçadeiras plásticas.

Na Fase 1 foram utilizadas 24 unidades, com o bocal azul claro e bailarina. Na Fase 2 foram utilizados com bocal branco, no número total de 132 unidades. Os microaspersores tiveram suas bailarinas substituídas por um elemento defletor de jato fixo 360° (Figura 6). Esta medida visa diminuir o tamanho das gotas dispensadas, melhorando a uniformidade de distribuição da água em situações de operação em baixas pressões de serviço.

Durante a Fase 2, cada microaspersor foi fixado junto ao lado convexo de um aparador (Figura 6). Os aparadores foram adaptados pelo corte longitudinal de um cano de PVC branco de 150 mm e têm como função impedir que a água dos emissores de uma bandeja chegue a qualquer outra bandeja, assim cada bandeja constitui uma unidade experimental individualizada.



**Figura 6:** Esquerda: microaspersor de jato fixo 360, posicionado verticalmente para cima, atado à mesa metálica por abraçadeiras plásticas. Direita – superior: microaspersor posicionado no lado côncavo do aparador. Direita – inferior: encaixe do microtúbulos na mangueira de polietileno.

Em ambas as fases, foram dispostos na quantidade de 4 emissores por bandeja, cada um próximo a uma quina da mesma, como na Figura 7.



**Figura 7:** Montagem utilizada para teste de uniformidade de distribuição de água com 4 emissores por bandeja, igualmente espaçados e posicionados próximos às quinas da bandeja.

### 3.1.6. Evapotranspiração de referência

A pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar interno é calculada pela equação que descreve a proposição de Tetens (ZOLNIER *et al.*, 2000):

$$e_s = 6,1078 \times 10^{[7,5 T_{in}/237,3+T_{in}]} \quad (\text{Eq. 02})$$

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (\text{Eq. 03})$$

$e_s$  – pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar interno (hPa);

$e_a$  – pressão real do vapor d'água à temperatura do ar interno (hPa);

$UR$  – umidade relativa do ar interno, %.

O déficit de pressão de vapor d'água do ar interno à casa de vegetação  $DPV_{ar}$ :

$$DPV_{ar} = 100 (e_s - e_a) \quad (\text{Eq. 04})$$

$DPV_{ar}$  – déficit de pressão de vapor d'água do ar, (Pa);

A pressão atmosférica local:

$$P_{atm} = 1013 \left[ \frac{(293 - 0,0065 z)^{5,26}}{293} \right] \quad (\text{Eq. 05})$$

$P_{atm}$  – pressão atmosférica local, (hPa);

$z$  – altitude média de Viçosa, MG,  $z = 670$  m.

A densidade absoluta do ar, obtida pela soma das densidades absolutas do vapor d'água e do ar seco, é estimada da seguinte forma:

$$\rho_{ar} = \frac{348,37 P_{atm} - 131,69 e_a}{1000 (T_{in} + 273,15)} \quad (\text{Eq. 06})$$

$\rho_{ar}$  – densidade absoluta do ar ( $Kg_{ar} \cdot m_{ar}^{-3}$ ).

A inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água ( $\Delta$ ) é:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(237,3 + T_{in})^2} \quad (\text{Eq. 07})$$

$$L = 2,5 \times 10^6 - 2370 T_{in} \quad (\text{Eq. 08})$$

$$\gamma = 100 \frac{c_{par} P_{atm}}{0,622 L} \quad (\text{Eq. 09})$$

$L$  - calor latente de evaporação, ( $\text{J Kg}^{-1}$ );

$\Delta$  - inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico, ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$c_{par}$  - calor específico do ar à pressão constante,  $1007 \text{ J Kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$ .

A evapotranspiração de referência:

$$ET_o = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_{ar} c_{par} DPV_{ar} r_a^{-1}}{\Delta + \gamma [1 + r_c r_a^{-1}]} \quad (\text{Eq. 10})$$

$r_c$  - resistência de superfície da cultura,  $70 \text{ s m}^{-1}$ ;

$r_a$  - resistência aerodinâmica, ( $\text{s m}^{-1}$ );

A resistência aerodinâmica, em função da inclinação da curva de pressão de saturação do vapor d'água e do coeficiente psicrométrico:

$$r_a = \frac{280 \Delta}{\Delta + \gamma} \quad (\text{Eq. 11})$$

A vantagem da estimativa da resistência aerodinâmica pela equação 11 é que  $r_a$  não tende a infinito quando a velocidade do vento atinge valores próximos de zero. Por isso a equação 10 é recomendada para ambientes como o de casas de vegetação (STEIDLE NETO; ZOLNIER; LOPES, 2014).

### 3.1.7. Balanço de radiação na casa de vegetação

Balanço de Radiação na Casa de Vegetação foi estimado conformas as equações 12, 13 e 14.

$$B_{oc} = (1 - \alpha) \cdot R_g \quad (\text{Eq. 12})$$

$B_{oc}$  é o Balanço de Ondas Curtas ( $\text{W m}^{-2}$ );  $\alpha$  é o albedo da cultura de referência (adotado como 0,23);  $R_g$  é a Radiação Solar Global medida pelo piranômetro ( $\text{W m}^{-2}$ ).

A estimativa do Balanço de Ondas Longas foi calculada conforme a equação 13 (WALKER; ALDRICH; SHORT, 1983):

$$B_{ol} = \varepsilon_s \cdot \epsilon \cdot \delta [(T_{in} + 273,15)^4 - \varepsilon_a (T_{ex} + 273,15)^4] \quad (\text{Eq. 13})$$

$B_{ol}$  - Balanço de Ondas Longas ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\varepsilon_s$  - emissividade média das superfícies internas à casa de vegetação, 0,85;

$\epsilon$  - transmitância térmica, 0,80;

$\delta$  - constante de Stefan-Boltzmann,  $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ;

$T_{in}$  - temperatura do ar interno à casa de vegetação ( $^{\circ}\text{C}$ );

$T_{ex}$  - temperatura do ar externo à casa de vegetação ( $^{\circ}\text{C}$ );

$$R_n = B_{oc} + B_{ol} \quad (\text{Eq. 14})$$

$R_n$  - Balanço de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ );

Por se tratar da estimativa de  $ET_o$  em escala horária, adotou-se o fluxo de calor no substrato como:

$$G = 0,1 R_n \quad (\text{Eq. 15})$$

$G$  – o fluxo de calor no substrato, ( $W/m^2$ );

## **3.2. Fase 1**

### **3.2.1. Avaliação do sistema**

Na Fase 1 a irrigação não foi diferenciada entre os tratamentos, portanto o sistema de irrigação foi avaliado com respeito ao raio de alcance dos microaspersores e quanto à vazão dos emissores. Foi estimada a Intensidade de Aplicação ( $IA$ ).

### **3.2.2. Sistema de aquisição de dados meteorológicos**

Os dados climáticos foram obtidos com uma estação meteorológica profissional (modelo E5000; Irriplus, MG, Brasil) instalada no interior da casa de vegetação, durante todo período de cultivo registrando as seguintes variáveis do microclima: Temperatura do ar, Umidade Relativa do ar e Radiação solar global.

### **3.2.3. Manejo da irrigação**

O sistema de irrigação foi automatizado por um microcontrolador modelo ATmega328P (ATMEL, CA, USA), em uma placa Arduino Uno, com funcionamento do tipo *timer*). As irrigações ocorreram 5 vezes ao dia, nos horários pré-determinados 9:00, 11:00, 13:00, 15:00 e às 18:00, para todos tratamentos.

As irrigações tiveram duração de 3 minutos durante a primeira semana e 5 minutos nas demais semanas. Após cada evento de irrigação a lâmina excedente drenou (e saiu pelas aberturas inferiores das células das bandejas) e o substrato retornou à umidade de capacidade de campo.

### **3.2.4. Definição dos tratamentos**

Foram plantadas 3 repetições para cada um dos tratamentos, definidos como na tabela 2, sendo cada repetição constituída por uma bandeja individualizada.

**Tabela 2:** Resumo da descrição dos 2 tratamentos experimentais da Fase 1.

<b>Tratamento</b>	<b>Hidrogel</b>
T1	Presente
T2	Ausente

### 3.2.5. Determinação do coeficiente de cultura ( $K_c$ )

Utilizou-se 12 bandejas plásticas com 128 células (0,26m x 0,52m; 8 células x 16 células) divididas em 2 tratamentos. As bandejas foram pesadas com balança (modelo Mark K12; TECNAL, SP, Brasil), como na Figura 8, com precisão de 0,1g, avaliadas 12 vezes no decorrer do ciclo, na parte da tarde de forma que a primeira pesagem ocorria 60 minutos após a irrigação, e a segunda pesagem ocorriam 60 minutos após a primeira pesagem.



**Figura 8:** Bandeja sobre balança representando esquema da lisimetria de pesagem.

Os coeficientes de cultura foram determinados para mudas cultivadas em substrato comercial para hortaliças puro e em substrato contendo hidrogel em dosagem pré-determinada.

Os valores de  $K_c$  foram estimados pela obtenção da variação da massa da bandeja proveniente da evapotranspiração da cultura (lisimetria de pesagem). Foram realizadas 2 pesagens consecutivas diárias ( $\Delta m = m_{j+1} - m_j$ ), espaçadas do intervalo de 60 minutos (realizadas no horário das 16h). Os valores de  $K_c$  são calculados pela Eq. 16 e a  $ET_o$  pela Eq. 10.

$$K_c = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} \frac{ET_c}{ET_o} \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde

$$ET_c = \frac{\Delta m}{d_{\text{água}} \cdot A_{\text{bandeja}}} \quad (\text{Eq. 17})$$

$K_c$  – Coeficiente de Cultura (adimensional);

$ET_o$  – Evapotranspiração de Referência (mm/h);

$ET_c$  – Evapotranspiração da Cultura (mm/h);

$\Delta m$  – Variação da massa de água (g);

$j$  – número de dias avaliados (dias);

$d_{\text{água}}$  – densidade da água, adotada 1000 g/L;

$A_{\text{bandeja}}$  – Área ocupada por plantas + substrato nu (m<sup>2</sup>).

O  $K_c$  foi calculado para a fase de muda de tomate produzida em bandeja pela equação 16, levando em consideração a média de 3 unidades experimentais (cada bandeja de 128 células corresponde a uma repetição) ao longo 12 observações (12 dias). Foi gerado um valor médio de  $K_c$  para toda a fase, para cada tratamento.

### 3.3. Fase 2

#### 3.3.1. Avaliação do sistema

O sistema de irrigação foi avaliado quanto à uniformidade de aplicação de água e calculou-se um coeficiente de eficiência de irrigação para correção da lâmina bruta.

Foram avaliadas 4 bandejas de cada modelo de microaspersor. Cada avaliação foi conduzida da seguinte maneira: Foram utilizados como coletores copos de acrílico (com volume máximo de 25 mL, área da boca de 11,34 cm<sup>2</sup>), sistematicamente posicionados sobre a bandeja, conforme a ilustração da Figura 9. Um total de 24 copos coletores foi distribuído por bandeja, somente na área que não corresponde à bordadura da mesma.

			x		x		x		x		x		x		
		x		x		x		x		x		x			
			x		x		x		x		x		x		
		x		x		x		x		x		x			

**Figura 9:** Esquema que representa o posicionamento dos coletores sobre a bandeja.

O volume obtido nos coletores foi utilizado para o cálculo da distribuição de água na área útil da bandeja, o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, utilizando a Eq. 17:

$$CUC = 100 \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_m|}{nq_m} \right) \quad (\text{Eq. 18})$$

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (%);

$q_i$  – vazão em um coletor (L/h);

$n$  – número de coletores;

$q_m$  – vazão média de  $n$  coletores (L/h).

A eficiência de irrigação foi considerada igual ao CUC, adotando a Área Adequadamente Irrigada de 80%. Logo:

$$\varepsilon_i = CUC \quad (\text{Eq. 19})$$

$\varepsilon_i$  – eficiência de irrigação, adimensional ( $0,00 < \varepsilon_i < 1,00$ ).

### 3.3.2. Sistema de aquisição de dados meteorológicos

O sistema de aquisição e processamento de dados meteorológicos e também de controle experimental da irrigação foi elaborado utilizando um microcontrolador ATmega 2560 em uma placa de desenvolvimento Arduino ATmega, um módulo Real Time Clock (RTC), um módulo de cartão de memória

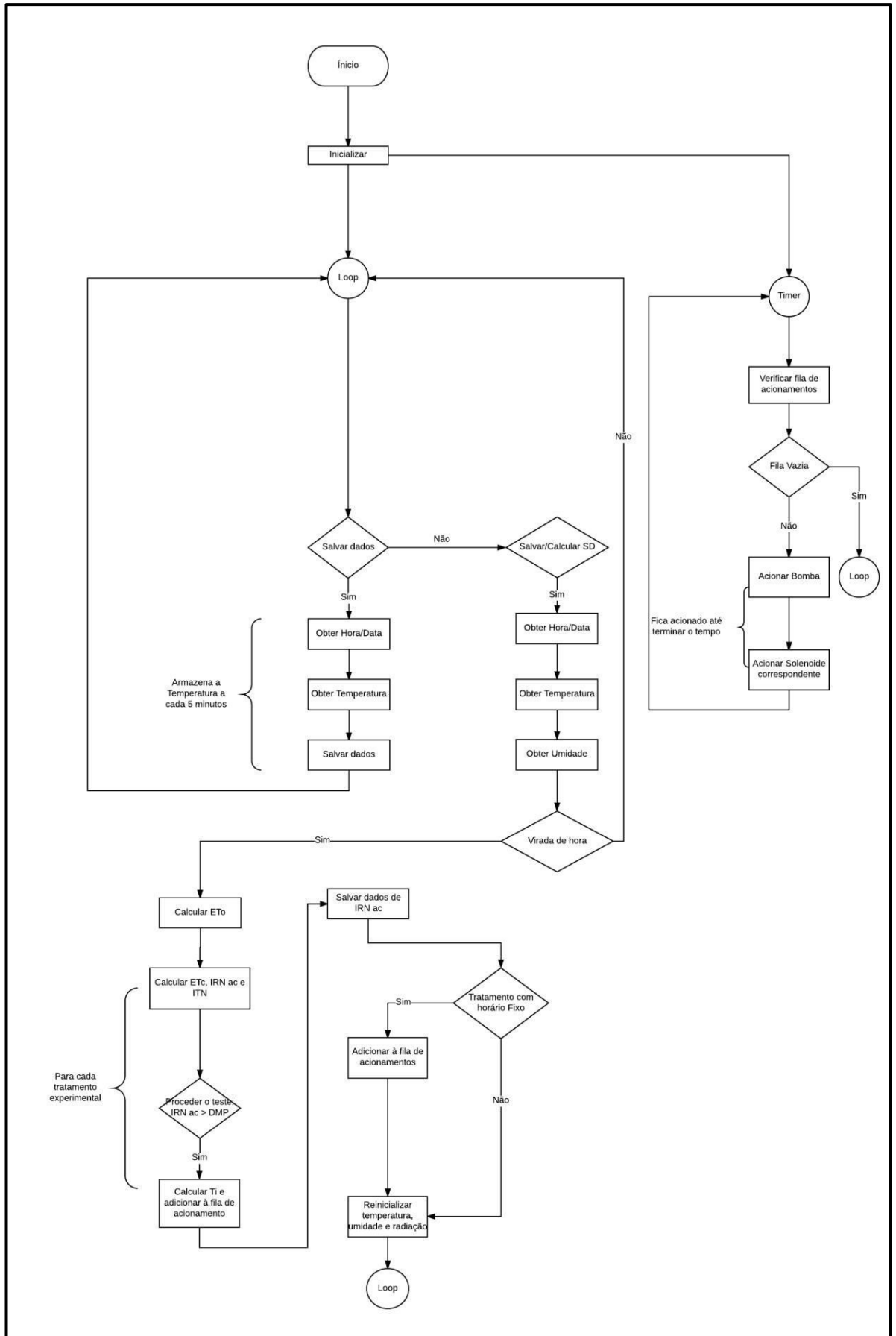
MicroSD, um sensor de Temperatura do ar e Umidade Relativa do ar e sensor de Radiação global (piranômetro).

O Arduino ATmega possui processador modelo ATmega 2560 com RAM 8 KB, flash 256 KB, 12 bits e 81 pinos (sendo 15 analógicos e 53 digitais).

O módulo MicroSD permite o programa armazenar dados em um cartão formato MicroSD na forma de texto (.txt) ou de planilha eletrônica (.csv), ambos formatos compatíveis com diversos softwares de tratamento de dados.

O *RTC* é um módulo que funciona como um relógio externo ao microcontrolador. Ele é responsável pela marcação do tempo e possui como fonte própria de alimentação uma bateria (modelo CR2032; tensão de 3V) que impede a pausa na contagem do tempo mesmo em casos de queda de fornecimento de energia ao microcontrolador.

Dois programas foram elaborados em C++ e compilados no IDE Arduino 1.8.1. O programa utilizado na Fase 1 foi carregado no Arduino Uno e foi responsável por controlar o funcionamento da motobomba de acordo com o *timer* de irrigação. O programa utilizado na Fase 2 (algoritmo da Figura 8) foi carregado no Arduino ATmega e foi responsável por controlar o funcionamento de todos os sensores, a aquisição e tratamento de dados, os cálculos matemáticos relacionados ao balanço hídrico de cada tratamento experimental e também as tomadas de decisão relacionadas à rotina de irrigação do experimento. Os códigos dos programas utilizados nas fases 1 e 2 do experimento estão no Anexo E e Anexo F, respectivamente.



**Figura 10:** Fluxograma do programa desenvolvido para a Fase 2 do experimento.

### 3.3.3. Sensor de temperatura do ar e umidade do ar

O monitoramento dos dados do microclima da casa de vegetação foi realizada a partir de sensores conectados ao Arduino ATmega.

Os dados das variáveis Temperatura do ar e Umidade Relativa do ar foram obtidos com o sensor DHT22 (modelo DHT22; Aosong, China), também conhecido como módulo AM2302.

Este sensor requer alimentação de 3,3 a 6,0 VDC e funciona de forma capacitiva. Seu elemento sensível é um polímero capacitor e trabalha operando com sinal digital (AOSONG, 2016).

A Umidade Relativa do ar é medida de 0.0% a 100.0%, com resolução de 0,1%; e a Temperatura do ar é medida de -40,0°C a 80,0°C, com resolução de 0,1°C. Esse sensor é interessante para esse projeto, pois pode transmitir os dados de longa distância até 100 m de fio, permitindo que o DHT22 seja posicionado em qualquer ponto de interesse do experimento (AOSONG, 2016).

### 3.3.4. Sensor de radiação solar

O sensor empregado é um piranômetro Li-cor modelo PY42792. Como esse sensor emite sinais de tensão de magnitude inferior à sensibilidade do microcontrolador Arduino, foi necessário fazer o processo de amplificação do sinal. Para isto foi utilizado um circuito integrado modelo AD620an (Analog Devices, Inc., 6, Norwood, MA) para amplificação do sinal.

Esse circuito integrado amplificador foi instalado entre o piranômetro e o Arduino ATmega de modo que o sinal captado pelo sensor passava pelo circuito integrado sendo amplificado e então era lido pelo Arduino ATmega.

O ganho de amplificação pode ser estimado de acordo com a equação 20 (ANALOG DEVICES, 2011).

$$G = 1 + \frac{49,4}{R_{ganho}} \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde:

$G$  – ganho do sinal (efeito da amplificação);

$R_{ganho}$  – resistência utilizada na montagem do AD620an (o resistor ligado entre os pinos 1 e 8 do C.I.), em  $K\Omega$ .

O circuito integrado foi montado de acordo com as instruções fornecidas em seu *datasheet* (ANALOG DEVICES, 2011).

O AD620an foi alimentado de maneira simétrica com + 5,7 V no pino 7 e - 5,7 V no pino 4, tensão contínua mantida por 2 baterias ligadas em série. A referência de tensão (zero V) foi ligada no pino 5.

Tomou-se o seu cuidado de ligar a referência do piranômetro ( $V_{in-}$ ) na referência do AD620an (pino 5), e também na referência do Arduino ATmega (pino GND) para se obter a leitura mais estável do sinal analógico.

Os fios do piranômetro  $V_{in-}$  e  $V_{in+}$  foram conectados aos pinos 2 e 3 do AD620an, respectivamente. O pino 6 do AD620an é a saída do sinal amplificado e foi conectado em uma entrada analógica do Arduino ATmega.

A montagem foi fixada com solda elétrica manual em uma placa de fenolite ilhada e perfurada (10,0 cm x 5,0 cm) para evitar mal contato nas conexões.

O sinal amplificado e medido na analógica é transformado pelo programa do Arduino ATmega em mV (Eq. 21) e então convertido em radiação (Eq. 22).

$$U_{mV} = 1000 \cdot \left( \frac{U_{med}}{G} \right) \quad (\text{Eq. 21})$$

$$R_g = 1000 \cdot \left( \frac{U_{mV}}{c_{PY}} \right) \quad (\text{Eq. 22})$$

$U_{mV}$  – sinal em mV;

$U_{med}$  – sinal medido e amplificado (V);

$G$  – ganho do sinal (efeito da amplificação);

$c_{PY}$  – constante do piranômetro, em  $mV/1000 Wm^{-2}$  ( $c_{PY} = 14,20 mV/1000 Wm^{-2}$ );

$R_g$  – radiação solar global ( $Wm^{-2}$ ).

### 3.3.5. Calibração dos sensores e testes do programa

O sensor DHT22 foi calibrado para a Temperatura do ar comparando-se suas leituras com leituras simultâneas em um termômetro de mercúrio (precisão  $1,0^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ). Foi feita uma regressão utilizando os dados observados, com ajuste linear segundo o modelo da Eq. 23:

$$T_{obs\ DHT22} = \alpha + \beta \cdot T_{obs\ Hg} \quad (\text{Eq. 23})$$

Os valores para Umidade Relativa do ar não foram calibrados.

O piranômetro Li-cor PY42792 foi calibrado com base em valores de radiação global medidos pelo piranômetro da estação meteorológica automática do INMET em Viçosa, que por sua vez foi aferido em comparação com um sensor padrão modelo CMP6 (Kipp & Zonen B.V.Delft, The Netherlands) (dados não mostrados).

Foi feita uma regressão com ajuste linear utilizando os dados obtidos pelo piranômetro Li-cor PY42792 e os dados da estação automática do INMET corrigidos, Eq. 24.

$$Rg_{PY} = \alpha + \beta \cdot Rg_{INMETc} \quad (\text{Eq. 24})$$

### 3.3.6. Testes do programa

O programa compilado no Arduino ATmega foi testado no ambiente do experimento por 29 dias de funcionamento antes do início do experimento para que pudesse ser melhorado até uma versão que possibilitasse a execução do mesmo.

### 3.3.7. Manejo da irrigação

O manejo da irrigação via clima foi realizado de maneira automatizada com um microcontrolador ATmega em uma placa de desenvolvimento Arduino. Iniciou-se o manejo com uma irrigação excessiva, de modo a garantir que o substrato atingiu a Capacidade de Campo.

Considerou-se para o manejo o balanço hídrico tal que a lâmina acumulada ( $IRN$ ) corresponde à soma das  $ET_c$  horárias entre dois eventos consecutivos de irrigação. O dreno foi considerado nulo no modelo assumindo que as irrigações foram realizadas com Intensidade de Aplicação ( $IA$ ) inferior à Taxa de infiltração de água no substrato. O escoamento superficial não foi constatado no sistema de irrigação nas bandejas, não houve chuvas (experimento no interior de casa de vegetação) (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

$$IRN_{ac} = ET_{c_{ac}} + dreno + escoamento + chuvas \quad (\text{Eq. 25})$$

$$IRN_{ac} = ET_{c_{ac}} \quad (\text{Eq. 26})$$

A cada vez que o relógio (RTC) marca uma virada de hora o microcontrolador faz os cálculos de médias horárias das variáveis climáticas temperatura média horária do ar ( $T_{ar}$ ), umidade relativa média horária do ar ( $UR_{ar}$ ) e radiação global média ( $R_g$ ) e calcula a  $ET_o$  horária ( $ET_o$ ). Em seguida, para cada tratamento experimental, calcula-se a  $ET_c$  horária ( $ET_c$ ) e a lâmina acumulada ( $IRN_{ac}$ ).

$f$  é a fração da quantidade de água retida no substrato ( $ARS$ ), em decimal, que vai representar o limite da depleção da água presente no substrato durante o ciclo. O  $DMP$  é o produto de  $f$  por  $ARS$  representado em mm (equação 27). No código do programa desenvolvido  $DMP$  representa o gatilho da irrigação no experimento.

$$DMP = f \cdot ARS \quad (\text{Eq. 27})$$

$DMP$  – Déficit Máximo Permitido (mm);

$f$  – fração da  $ARS$ , (adimensional,  $0,00 < f < 1,00$ );

$ARS$  – água retida no substrato (mm).

Em seguida procede-se o teste de comparação se a  $IRN_{ac}$  atingiu ao Déficit Máximo Permitido ( $DMP$ ) (equação 28).

$$IRN_{ac} \geq DMP \quad (\text{Eq. 28})$$

Para os tratamentos experimentais cujos valores de  $IRN$  atingirem o  $DMP$ , o algoritmo prevê o cálculo da Lâmina Bruta ou Irrigação Total Necessária ( $ITN$ ) e do Tempo de Irrigação ( $T_i$ ), de acordo com as equações 29 e 30:

$$ITN = \frac{IRN}{\varepsilon_i} \quad (\text{Eq. 29})$$

$$T_i = \frac{ITN}{IA} \quad (\text{Eq. 30})$$

Onde:

$ITN$  – Irrigação Total Necessária (mm);

$T_i$  – Tempo de Irrigação (minutos);

$\varepsilon_i$  – eficiência de irrigação, adimensional ( $0,00 < \varepsilon_i < 1,00$ ).

$IA$  – Intensidade de Aplicação de Água (mm/h).

O tratamento que for irrigado tem seus valores de  $IRN$ ,  $ITN$ ,  $T_i$  zerados e considera-se que o teor de água no substrato retornou à condição de CC.

### 3.3.8. Definição dos tratamentos

**Tabela 3:** Resumo da descrição dos 8 tratamentos experimentais da Fase 2.

Tratamento	Hidrogel	timer	% $ET_o$	$K_c$	$DMP$
T1	presente	SIM	-	-	-
T2	ausente	SIM	-	-	-
T3	presente	-	-	1,55	1,00
T4	ausente	-	-	1,39	1,00
T5	presente	-	50%	-	1,00
T6	ausente	-	50%	-	1,00
T7	presente	-	100%	-	1,00
T8	ausente	-	100%	-	1,00

### 3.3.9. Variáveis e índices analisados

Alguns trabalhos mostram que a produção de matéria seca e/ou crescimento vegetal podem ser bem avaliados a partir das variáveis medidas e de parâmetros estimados (MATSUDA; OZAWA; FUJIWARA, 2014).

As análises de crescimento e qualidade das mudas de tomateiro foram realizadas a partir da mensuração das seguintes variáveis, em 6 avaliações distribuídas ao longo da fase de muda:

$MS_r$  – Massa da Matéria Seca Vegetal de Sistema Radicular (g);

$MS_{pa}$  – Massa da Matéria Seca Vegetal de Parte Aérea (g);

$L_r$  – Comprimento radicular ou de raiz (cm);

$L_{pa}$  – Comprimento de parte aérea ou altura da planta (cm).

Também foram mensuradas, uma única vez ao fim da fase de muda, as seguintes variáveis:

$DC$  – Diâmetro do colo da muda (cm);

$Ap$  – área da projeção da copa da planta sobre a bandeja ( $dm^2$ ).

A partir das variáveis acima mensuradas foram calculados os parâmetros a seguir.

Taxa de crescimento relativo ( $TCR$ ) (*Mean Relative Growth Rate*) (HUNT, 1982):

$$TCR = \frac{\ln MS_f}{\ln MS_i \cdot (t_f - t_i)} \quad (\text{Eq. 31})$$

A  $TCR$  foi calculada para sistema radicular, parte aérea e para a planta inteira ( $TCR_r$ ,  $TCR_{pa}$  e  $TCR_t$ ; respectivamente).

Taxa de produção de matéria seca (*TPMS*) (LUCHESEI, 1984):

$$TPMS = \frac{(MS_f - MS_i)}{Ap \cdot (t_f - t_i)} \quad (\text{Eq. 32})$$

A *TPMS* foi calculada para sistema radicular, parte aérea e para a planta inteira (*TPMS<sub>r</sub>*, *TPMS<sub>pa</sub>* e *TPMS<sub>t</sub>*; respectivamente).

Relação parte aérea/diâmetro do colo (*RPADC*) (STURION; IEDE, 1982):

$$RPADC = \frac{L_{pa}}{DC} \quad (\text{Eq. 33})$$

Onde,

*TCR* – Taxa de Crescimento Relativo da planta ( $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

*MS<sub>i</sub>* – Massa da matéria seca vegetal na amostragem inicial (g);

*MS<sub>f</sub>* – Massa da matéria seca vegetal na amostragem final (g);

*t<sub>i</sub>* – Tempo no qual ocorreu a amostragem inicial (dias);

*t<sub>f</sub>* – Tempo no qual ocorreu a amostragem final (dias);

*Ap* – área da projeção da copa da planta sobre a bandeja ( $\text{dm}^2$ );

$\ln X$  – logaritmo natural ou logaritmo neperiano de uma variável X;

*MS<sub>pa</sub>* – Massa da Matéria Seca Vegetal de Parte Aérea (g);

*MS<sub>r</sub>* – Massa da Matéria Seca Vegetal de Sistema Radicular (g);

*TPMS* – Taxa de Produção de Matéria Seca ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

*RPADC* – Relação Parte Aérea/Diâmetro do Caule (adimensional);

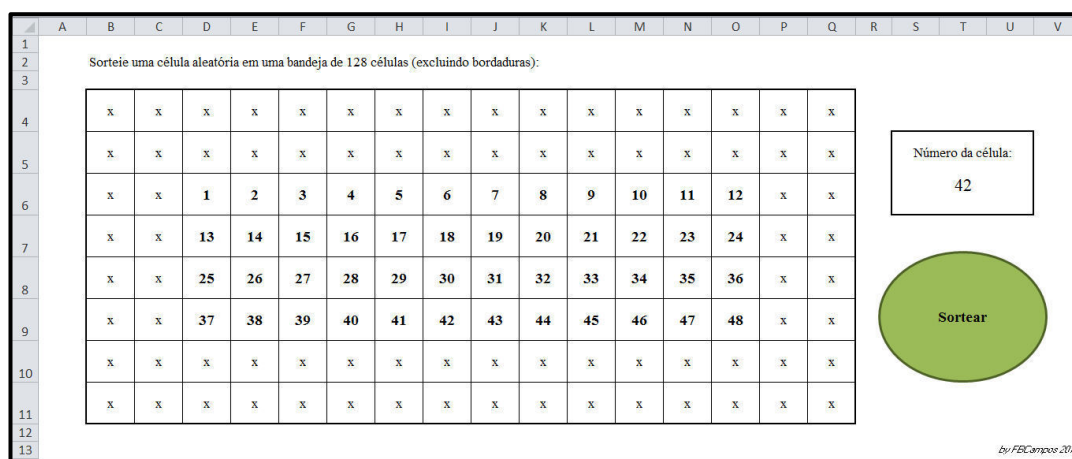
*DC* – Diâmetro do Caule (cm);

*L<sub>pa</sub>* – Comprimento da parte aérea (cm);

*L<sub>r</sub>* – Comprimento da parte radicular (cm).

As plântulas foram amostradas de maneira aleatória. Para isso foi construído um gerador de número aleatório no Microsoft Office Excel 2010, utilizando função Macro e a FUNÇÃO =ALEATÓRIO( ) *hiperlinkada* a um botão,

conforme na Figura 11. O gerador exclui a bordadura de duas fileiras em todas as laterais da bandeja e sorteia uma célula entre as 48 células internas. Foi elaborada uma lista para cada unidade experimental com os números sorteados para todo o experimento, esta lista foi utilizada na casa de vegetação.



**Figura 11:** Planilha eletrônica montada no M.O. Excel 2010 para sorteio de mudas a serem avaliadas.

Para cada dia de avaliação foram retiradas 2 mudas de cada uma das 32 unidades experimentais, totalizando 64 plantas avaliadas por vez.

Estas plantas eram separadas, levadas ao laboratório de Hidráulica da UFV, *campus* Viçosa – MG, onde eram lavadas com jato de água utilizando pissetas. A limpeza tem objetivo de remover o máximo possível do substrato e de nódulos de hidrogel aderidas às raízes.

Em seguida as plantas eram medidas com régua ( $0,00 \pm 0,05$  cm). As raízes eram medidas depois de esticadas manualmente sobre superfície plana. A parte aérea era medida do colo da planta até o meristema apical.

Depois de medidas as plantas eram secas com papel de boa absorção e cortadas: parte aérea separada da parte radicular no ponto do colo da planta. Assim, ambas as partes eram pesadas em balança digital com precisão de 0,1 g (modelo AUW220D; Shimadzu, Kyoto, Japão) para obtenção da Massa Fresca. Em seguida, cada planta – devidamente individualizada e identificada – era levada à estufa elétrica e seca até massa constante à temperatura de  $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Os valores de Massa Total foram obtidos somando as massas seca de parte aérea e de raiz.

*DC* foi mensurado com paquímetro digital (modelo 150 mm Precision, ZAAS) com precisão  $(0,00 \pm 0,01)$  mm, somente em uma das avaliações.

*Ap* foi estimada ao final do ciclo medindo, com régua  $(0,00 \pm 0,35)$  mm<sup>2</sup>, o retângulo que se encaixa nos pontos extremos das folhas da planta, quando projetada a copa desta sobre um plano cartesiano perpendicular ao caule da planta.

Após cada retirada de plantas das bandejas, o procedimento de preenchimento de células vazias era executado. Este procedimento consiste em mover, dentro da mesma bandeja, uma muda de bordadura para o local da muda perdida na avaliação. Esta muda movida era devidamente marcada com um pedaço de canudo plástico. Assim as mudas restantes (vizinhas às avaliadas) não ficaram expostas aos efeitos de compensação e de bordadura podendo ser avaliadas nas próximas campanhas.

### **3.3.10. Análise estatística**

As unidades experimentais foram distribuídas na casa de vegetação de maneira inteiramente casualizada. Algumas das variáveis morfológicas e dos índices de qualidade de muda foram avaliadas ao longo do ciclo e outros somente ao final do ciclo de produção. As análises estatísticas, realizadas com auxílio do software estatístico SAEG, foram feitas da seguinte maneira:

#### **3.3.10.1. Variáveis monitoradas ao longo do ciclo de produção da muda do tomateiro**

As variáveis morfológicas Comprimento radicular ( $L_r$ ), Comprimento de parte aérea ou altura da planta ( $L_{pa}$ ), Massa da Matéria Seca Vegetal de Sistema Radicular ( $MS_r$ ), e Massa da Matéria Seca Vegetal de Parte Aérea ( $MS_{pa}$ ), foram avaliadas ao longo do ciclo, com 6 dias de coletas de dados.

O esquema adotado foi de parcelas subdivididas, sendo nas parcelas um esquema fatorial 4 x 2 (manejo de irrigação com quatro níveis, *timer*,  $K_c$ ,  $0,50ET_o$  e  $1,00ET_o$ , e substratos com dois níveis, presença de hidrogel e ausência de hidrogel). Nas subparcelas há o tempo (6 dias de avaliação). O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com 4 repetições.

Os dados foram interpretados por meio de Análise de Variância e de regressão. Em fatores qualitativos as médias foram comparadas com teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para fatores quantitativos utilizou-se regressão e os modelos foram escolhidos baseados na significância do coeficiente de regressão utilizando o teste de t, adotando o nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação e no comportamento do fenômeno em estudo.

### **3.3.10.2. Variáveis avaliadas ao fim do ciclo de produção da muda do tomateiro**

As variáveis morfológicas diâmetro do colo da muda (*DC*) e área da projeção da copa da planta sobre a bandeja (*Ap*) e os índices relação parte aérea/diâmetro do colo (*RPADC*), a taxa de produção de matéria seca (*TPMS*) e a Taxa de crescimento relativo (*TCR*) foram avaliadas somente ao fim do experimento, sendo analisados estatisticamente no esquema fatorial 4 x 2 (manejo de irrigação com quatro níveis, *t<sub>irrig</sub>*,  $K_c$ ,  $0,50ET_o$  e  $1,00ET_o$ , e substratos com dois níveis, presença de hidrogel e ausência de hidrogel). O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com 4 repetições.

O procedimento adotado para interpretação dos dados foi a Análise de Variância a 5% de probabilidade pelo teste F.

Para os casos onde houve interação significativa entre os fatores substratos e manejos de irrigação realizou-se o desdobramento dos fatores. Quando não houve interação significativa entre os fatores cada fator foi estudado separadamente.

As médias dos substratos foram analisadas pelo próprio teste F ao nível de 5% de probabilidade. As médias dos manejos foram estudadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Fase 1

#### 4.1.1. Avaliação do sistema de irrigação

A vazão dos emissores utilizados (bocal azul claro, com bailarina) durante a Fase 1 foi de  $15,5 \text{ L h}^{-1}$  e a Intensidade de Aplicação estimada de  $7,7 \text{ mm h}^{-1}$ .

#### 4.1.2. Obtenção do coeficiente de cultura ( $K_c$ )

O  $K_c$  médio da fase de mudas para tomate obtido para cultivo em substrato com e sem a presença de hidrogel está na tabela 4.

**Tabela 4:** Valores médios de  $K_c$  obtidos por lisimetria de pesagem na Fase 1 do experimento.

Tratamento	$K_c$
Sem hidrogel	1,39
Com hidrogel	1,55

Nas estimativas de evapotranspiração o ambiente é representado pela  $ET_o$  e o  $K_c$  traduz a efeitos das plantas na evapotranspiração. Os valores de  $K_c > 1$  ocorrem porque o sistema de cultivo em bandejas é um sistema bastante intensivo. São 128 plântulas em  $0,1352 \text{ m}^2$ . Em poucos dias as plântulas passam a sombrear a bandeja e aumentam a componente de transpiração. E considerando um sistema de irrigação com molhamento foliar, as folhas das mudas acabam recebendo grande parte da água aplicada, devolvendo-a rapidamente ao ambiente por evaporação. Este efeito associado à intensidade do sistema de cultivo em bandejas justifica um valor alto de  $K_c$  para fase de muda.

O  $K_c$  de mudas cultivadas com hidrogel é mais alto que sem hidrogel, segundo os resultados da Fase 1 (tabela 4). Esta diferença entre os tratamentos do substrato deve-se ao desenvolvimento vegetativo ter sido consideravelmente

diferente entre os tratamentos. Apesar desta diferença não ter sido formalmente avaliada nesta fase (estas avaliações foram conduzidas na Fase 2), foi notada na casa de vegetação, como pode ser percebido visualmente. Este efeito também foi percebido por (TATAGIBA *et al.*, 2015) em mudas de eucalipto em casa de vegetação, onde o  $K_c$  de mudas cultivadas com hidrogel foi de 1,25.

A presença do hidrogel no substrato provoca aumento na retenção de água, melhorando a eficiência do uso desta (SANTOS *et al.*, 2015) e também de nutrientes (FAGUNDES *et al.*, 2015), fazendo com que as mudas não passem por estresses hídricos ou nutricionais e, portanto, se desenvolvam vegetativamente melhor (NAVROSKI *et al.*, 2016). O desenvolvimento vegetativo influencia na demanda hídrica da cultura, pois um aumento no comprimento de parte aérea ou na área foliar ocasionam um aumento no  $K_c$ , e por sua vez um aumento na  $ET_c$ , segundo a equação 16 (ALLEN *et al.*, 1998).

## 4.2. Fase 2

### 4.2.1. Avaliação do sistema de irrigação

O sistema de irrigação foi avaliado conforme a metodologia e os resultados estão apresentados na tabela 5.

**Tabela 5:** Avaliação do sistema de irrigação: Uniformidade média estimada de distribuição da água (**CUC**), eficiência estimada de irrigação ( $\epsilon_i$ ) e Intensidade de Aplicação estimada de água (**IA**) no sistema.

<b>Bocal</b>	<b>azul claro</b>	<b>Branco</b>
CUC (%)	88	85
$\epsilon_i$ (-)	88	85
IA (mm/h)	32,6	36,3

#### **4.2.2. Água Retida no Substrato (ARS) e Déficit Máximo Permitido (DMP)**

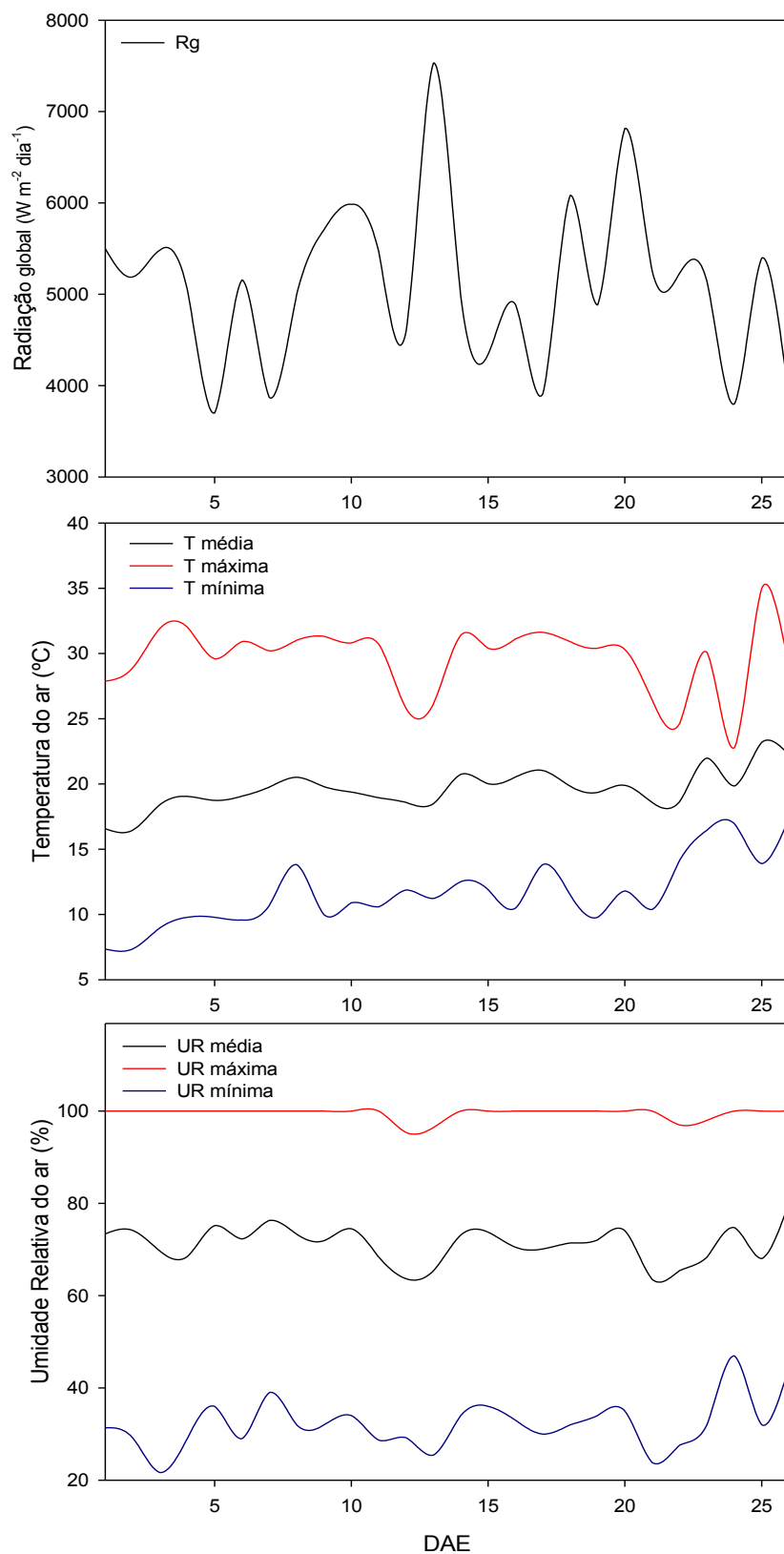
A água retida em substratos para cultivo de muda é definida entre o ponto de capacidade de campo e o ponto do substrato seco em estufa a 105°C (TATAGIBA *et al.*, 2015). No presente trabalho foi adotado um referencial diferente, considerando entre as condições de plantio e a capacidade de campo. A lâmina média de água retida no substrato foi então  $ARS = 4,40$  mm.

O *DMP* é a lâmina de referência para que ocorra um evento de irrigação. Este valor é o gatilho da irrigação automatizada e foi adotado como  $DMP = 1,00$  mm, pois em simulações prévias em planilha eletrônica (para as condições microclimáticas da casa de vegetação) percebeu-se que valores superiores a 1,50 mm fariam com que o número de eventos de irrigações fosse baixo; e valores inferiores a 1,00 mm implicariam em tempos de irrigação muito pequenos, aumentando o erro experimental. Logo, o experimento seria mais bem executado com  $DMP = 1,00$  mm. Da eq. 27, tivemos então a fração  $f = 0,227$ .

#### **4.2.3. Microclima na casa de vegetação**

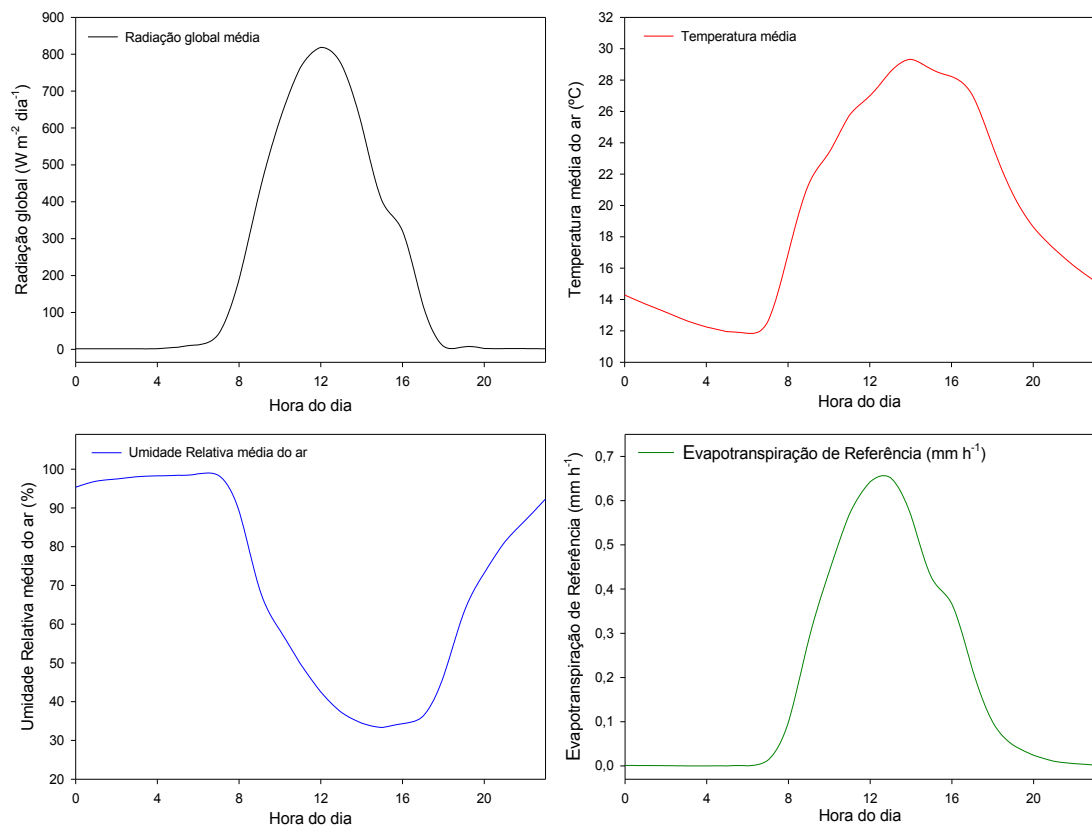
O microclima na casa de vegetação foi monitorado durante o ciclo de produção de muda. A radiação global, a temperatura média do ar e a umidade relativa média do ar foram calculadas para valores diários do ciclo (Figura 12). A radiação global variou de cerca de  $4000 \text{ W m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  a  $7000 \text{ W m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , em dias parcialmente nublados a ensolarados. As médias das temperaturas máximas, médias e mínimas do ar, assim como as médias das umidades relativas máximas, médias e mínimas do ar apresentaram menor amplitude no final do ciclo, em dias mais nublados, úmidos e quentes.

A radiação global horária, a temperatura média horária do ar, a umidade relativa média horária do ar e evapotranspiração de referência média horária estão representadas na Figura 13, calculadas para o ciclo de muda, com médias dos 25 dias representadas ao longo das 24 horas.



**Figura 12:** Caracterização do microclima (radiação global diária, temperaturas médias diárias do ar e umidades relativas médias diárias do ar) durante o ciclo de produção, da emergência até o 25° DAE.

Os perfis representados correspondem ao esperado (ALLEN *et al.*, 1998): a radiação global tem máximo próximo ao meio dia, mostrando o perfil de dia ensolarado. As temperaturas médias horárias do ar são mais baixas durante a noite e têm valores altos entre 9h e 19h (superiores a 20° C). A umidade relativa média horária do ar é máxima entre 0h e 8h, diminuindo com o aumento da radiação global, atingindo o mínimo (35%) por volta das 16h. A evapotranspiração de referência média calculada com essas 3 primeiras variáveis apresenta perfil semelhante à radiação global, com máximo de aproximadamente 0,65 mm h<sup>-1</sup> às 12h.



**Figura 13:** Caracterização do microclima (radiação global horária, temperatura média horária do ar, umidade relativa média horária do ar e evapotranspiração de referência média horária) durante o ciclo de produção, representadas ao longo das 24 horas.

#### 4.2.4. Balanço hídrico

O balanço hídrico foi realizado em tempo real durante o experimento, considerando interações a cada 60 minutos. Nos gráficos da Figura 14 pode-se ver o comportamento do Balanço adotado para os manejos timer (com e sem gel),  $K_c$

(com gel),  $K_c$  (com gel),  $0,50ET_0$  (com e sem gel), e  $1,00ET_0$  (com e sem gel), durante os 25 dias do ciclo.

Pode-se ver a  $ET_0$  horária, a  $ET_c$  horária, a lâmina acumulada ( $IRN_{ac}$ ) e a lâmina aplicada ( $IRN_{apl}$ ). Vê-se também a frequência e o número de eventos de irrigação realizados em cada tratamento experimental. Na figura 14 foi apresentado O balanço completo. Nele constam, para o ciclo inteiro das mudas em casa de vegetação, informações do balanço hídrico para os 8 tratamentos, em 5 gráficos.

Nos manejos (1º gráfico de cima para baixo), tanto para ausência como para presença de hidrogel no substrato, não houve cálculo de evapotranspiração da cultura e a irrigação foi decidida com frequência e lâminas aplicada constantes, independentes do microclima.

Nos demais tratamentos o algoritmo utilizado na automatização decidiu cada evento de irrigação considerando dados do microclima da casa de vegetação para o cálculo da demanda evapotranspirométrica.

Os balanços hídricos para o manejo  $K_c$  e presença de hidrogel no substrato (2º gráfico de cima para baixo) e para o manejo  $K_c$  na ausência de hidrogel no substrato (3º gráfico de cima para baixo) foram embasados nos resultados da Fase 1. Como estes resultados foram coeficientes maiores que 1,00, tem-se valores de  $ET_c$  superiores a  $ET_0$ . O perfil dos balanços hídricos do manejo  $K_c$  foram semelhantes, porém as lâminas aplicadas na presença de hidrogel tiveram amplitudes maiores.

O manejo  $0,50ET_0$ , tanto para ausência como para presença de hidrogel no substrato (4º gráfico de cima para baixo), foi caracterizado por irrigação em déficit e no perfil do balanço hídrico pode-se notar que a amplitude da  $ET_c$  é inferior à amplitude da  $ET_0$ , com isso as lâminas aplicadas são menores que as lâminas aplicadas nos outros tratamentos.

Em vista do gatilho DMP da irrigação ser o mesmo para todos os tratamentos e os valores de  $ET_c$  em  $0,50ET_0$  serem mais baixos que nos outros tratamentos, resultou em irrigações mais espaçadas para o manejo  $0,50ET_0$ .

Na 5º gráfico de cima para baixo é apresentado o balanço hídrico no manejo  $1,00ET_0$ , tanto para ausência como para presença de hidrogel no substrato. Neste perfil as curvas de  $ET_c$  e  $ET_0$  se sobrepõem.

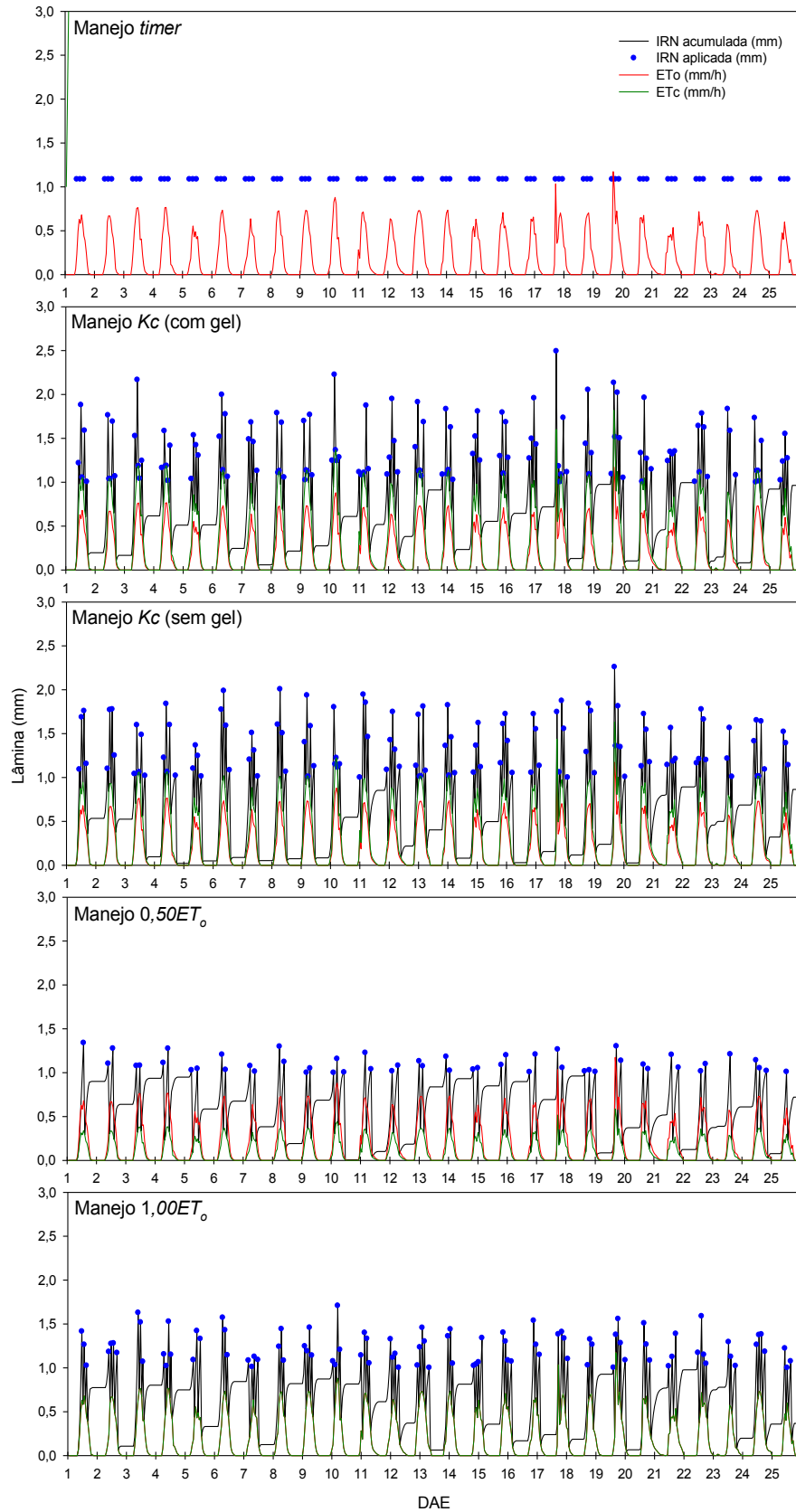
Em relação aos demais perfis de balanço hídrico o manejo  $1,00ET_o$  apresentou comportamento intermediário entre  $K_c$  e  $0,50ET_o$ , tanto na amplitude dos pontos de lâmina aplicada como na frequência de eventos de irrigação.

A tabela 6 apresenta um resumo com informações complementares considerando o Número médio de irrigações realizadas ( $\bar{N}_{irr}$ ), tempo médio de duração da irrigação ( $\bar{T}_{irr}$ ) e a lâmina líquida total aplicada ( $L_{irr}$ ).

Nota-se que  $\bar{N}_{irr}$  e  $L_{irr}$  dos tratamentos  $K_c$  foram superiores aos demais, caracterizando os tratamentos com maior disponibilidade de água. Os tratamentos do manejo  $1,00ET_o$  apresentaram médias intermediárias de  $\bar{N}_{irr}$  e  $L_{irr}$ , quando comparados com  $K_c$  e  $0,50ET_o$ , assim como foi observado nos perfis dos balanços hídricos. Os tratamentos com o manejo  $0,50ET_o$  apresentaram menores valores para  $\bar{N}_{irr}$ ,  $L_{irr}$  e  $\bar{T}_{irr}$ .

**Tabela 6:** Número médio de irrigações realizadas ( $\bar{N}_{irr}$ ), tempo médio de duração da irrigação ( $\bar{T}_{irr}$ ) e lâmina líquida total aplicada ( $L_{irr}$ ).

Tratamento	$\bar{N}_{irr}$	$\bar{T}_{irr}$ (min)	$L_{irr}$ (mm)
<i>timer</i> – com gel	78	2,0	84,8
<i>timer</i> – sem gel	78	2,0	84,8
$K_c$ – com gel	130	2,5	176,7
$K_c$ – sem gel	117	2,5	159,0
$0,50ET_o$ – com gel	52	1,8	56,6
$0,50ET_o$ – sem gel	52	1,8	56,6
$1,00ET_o$ – com gel	94	2,0	113,6
$1,00ET_o$ – sem gel	94	2,0	113,6



**Figura 1410:** Balanço hídrico realizado pelo microcontrolador para os manejos *timer* (com e sem gel),  $K_c$  (com gel; 1,55),  $K_c$  (sem gel; 1,39),  $0,50ET_0$  (com e sem gel), e  $1,00ET_0$  (com e sem gel), durante os 25 dias do ciclo.

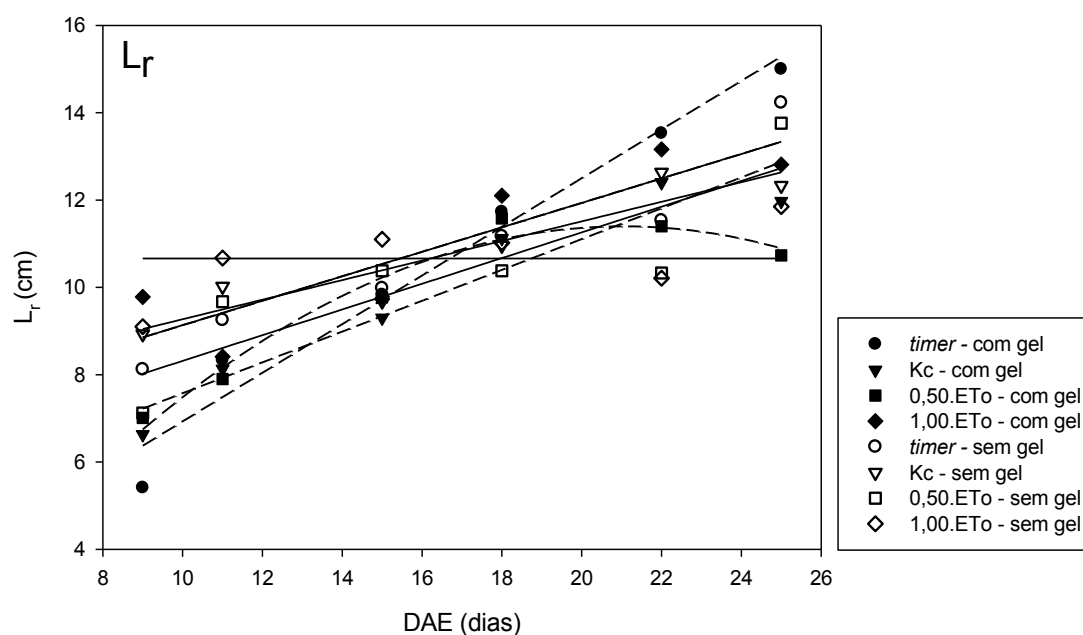
## 4.2.5. Avaliações morfológicas

### 4.2.5.1. Comprimento de raiz ( $L_r$ )

Para  $L_r$  não houve diferença significativa na interação Dia x Manejo x Substrato, porém houve diferença significativa entre Dia e Substrato e também entre Dia e Manejo (Anexo C, tabela 17). Os valores médios de  $L_r$  estão na tabela 7 e as curvas ajustadas na Figura 15.

O comprimento  $L_r$  foi medido com a raiz lavada, escolhendo-se a raiz mais longa da planta, portanto os resultados esperados são em função do sistema radicular ter seu crescimento fisicamente limitado à célula da bandeja.

Existe a limitação no desenvolvimento radicular em profundidade, pois quando as raízes atingem a parte inferior da célula e saem do substrato ocorre o contato com o ar e possivelmente com a radiação solar. Esse processo acarreta a morte do meristema radicular. Logo, o desenvolvimento radicular que ocorre é o de raízes secundárias e não o desenvolvimento em profundidade. Então, é esperado que não haja diferença significativa em  $L_r$  durante o ciclo de muda, tanto para os níveis dos fatores Manejo quanto para os diferentes níveis de Substrato.



**Figura 15:** Valores médios observados e regressões para Comprimento de Raiz ao longo do ciclo de muda.

**Tabela 7:** Valores médios de Comprimento radicular ( $L_r$ ) em cm, na produção de mudas na presença e ausência de hidrogel, sob diferentes manejos de irrigação.

Manejo	9° DAE		11 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	5,41 Bb	8,12 Aa	8,33 Aa	9,25 Aa
<i>Kc</i>	6,63 ABa	8,93 Aa	8,13 Aa	10,02 Aa
<i>0,50 ETo</i>	7,01 ABa	7,12 Aa	7,90 Aa	9,67 Aa
<i>1,00 ETo</i>	9,78 Aa	9,10 Aa	8,41 Aa	10,67 Aa
Manejo	15° DAE		18 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	9,83 Aa	9,98 Aa	11,73 Aa	11,17 Aa
<i>Kc</i>	9,30 Aa	9,68 Aa	11,12 Aa	10,96 Aa
<i>0,50 ETo</i>	9,77 Aa	10,38 Aa	11,58 Aa	10,38 Aa
<i>1,00 ETo</i>	9,73 Aa	11,10 Aa	12,10 Aa	11,02 Aa
Manejo	22° DAE		25 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	13,53 Aa	11,53 Aa	15,00 Aa	14,23 Aa
<i>Kc</i>	12,40 Aa	12,63 Aa	11,97 Aba	12,33 Aa
<i>0,50 ETo</i>	11,40 Aa	10,33 Aa	10,73 Bb	13,76 Aa
<i>1,00 ETo</i>	13,16 Aa	10,21 Ab	12,81 Aba	11,85 Aa

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.2.5.1.1. Analisando os níveis de Manejo dentro de Substrato

Com hidrogel,  $L_r$  apresentou diferenças no início do ciclo (9° DAE) e no fim do ciclo (25° DAE), como visto na Figura 15. No 9° DAE a diferença provavelmente se deu à germinação desuniforme que ocorreu distribuída ao longo de 5 dias (intervalo entre o semente e o dia em que foi considerada concluída a emergência de plântulas). No 25° DAE a diferença encontrada foi entre os manejos, em que o timer apresentou média superior ao 0,50ET<sub>o</sub>. Este efeito de maior média de  $L_r$  no final do ciclo possivelmente está associado a algum erro experimental, pois não se explicam por motivos comuns considerando o sistema de produção destas mudas. Nas demais avaliações do ciclo não foram encontradas diferenças significativas para o  $L_r$  (tabela 7) conforme era esperado.

Sem hidrogel não foram encontradas diferenças significativas para os manejos em nenhum dia avaliado.

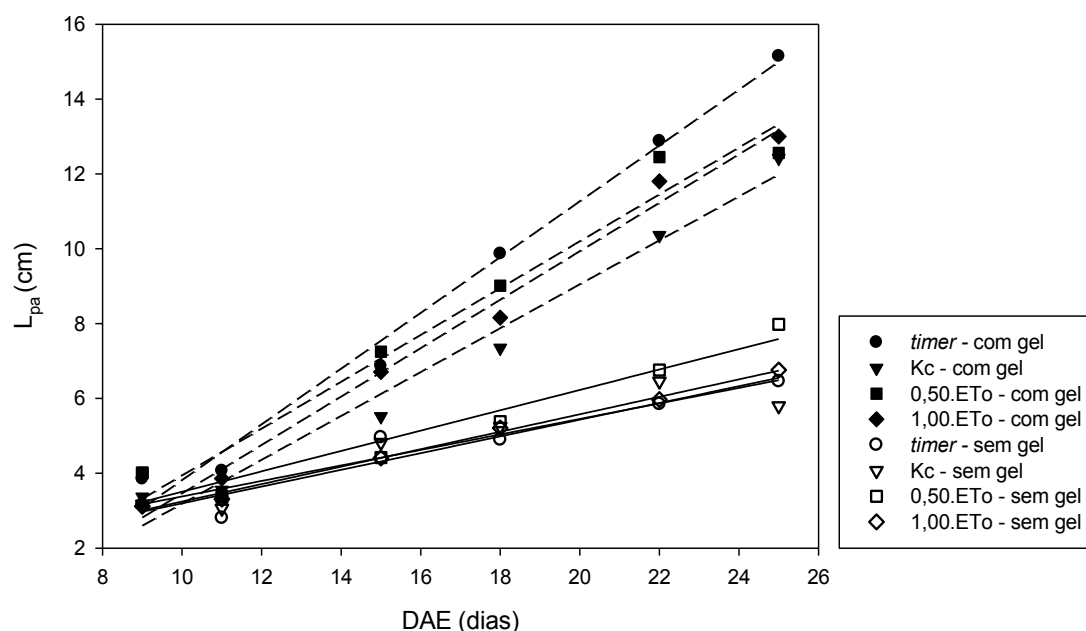
#### 4.2.5.1.2. Analisando os níveis Substrato dentro de Manejo

Avaliando os níveis de Substrato dentro de cada nível de Manejo não foram encontradas diferenças significativas (Anexo C, tabela 17). As equações de regressão para  $L_r$  estão no Anexo D (tabela 22).

Os testes estatísticos mostraram o resultado conforme esperado (médias na tabela 7, ANOVA na tabela 17) exceto para o 9º DAE e para o 25º DAE, cujas justificativas são as mesmas para o item 4.2.5.1.1.

#### 4.2.5.2. Comprimento da parte aérea ( $L_{pa}$ )

Trabalhou-se definindo o Comprimento de parte aérea definido como a distância entre o colo da muda ao meristema apical. Os valores médios observados e regressões para Comprimento de Parte Aérea ao longo do ciclo de muda podem ser observados na Figura 16.



**Figura 16:** Valores médios observados e regressões para Comprimento de Parte Aérea ao longo do ciclo de muda.

Para o  $L_{pa}$ , a Análise de Variância mostra que houve interação significativa entre os fatores Dia x Manejo x Substrato e também para as interações Manejo x Substrato, Dia x Substrato e Dia x Manejo (Anexo C, tabela 17). Os valores médios de  $L_{pa}$  estão na tabela 8 e as curvas ajustadas na Figura 16.

**Tabela 8:** Valores médios de Comprimento de Parte Aérea ( $L_{pa}$ ) em cm, na produção de mudas na presença e ausência de hidrogel, sob diferentes manejos de irrigação.

Manejo	9° DAE		11 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
	<i>Timer</i>	3,85 Aa	3,15 Aa	4,07 Aa
<i>Kc</i>	3,37 Aa	3,17 Aa	3,55 Aa	3,06 Aa
<i>0,50 ETo</i>	4,01 Aa	4,01 Aa	3,40 Aa	3,36 Aa
<i>1,00 ETo</i>	3,12 Aa	3,12 Aa	3,86 Aa	3,31 Aa

Manejo	15° DAE		18 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
	<i>Timer</i>	6,87 Aba	4,96 Ab	9,87 Aa
<i>Kc</i>	5,52 Ba	4,82 Aa	7,35 Ca	5,25 Ab
<i>0,50 ETo</i>	7,25 Aa	4,42 Ab	9,01 ABa	5,38 Ab
<i>1,00 ETo</i>	6,71 Aba	4,41 Ab	8,16 BCa	5,21 Ab

Manejo	22° DAE		25 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
	<i>Timer</i>	12,88 Aa	5,85 Ab	15,15 Aa
<i>Kc</i>	10,36 Ba	6,46 Ab	12,42 Ba	5,80 Bb
<i>0,50 ETo</i>	12,45 Aa	6,76 Ab	12,56 Ba	7,98 Ab
<i>1,00 ETo</i>	11,80 Aa	5,97 Ab	13,00 Ba	6,76 ABb

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Quanto ao  $L_{pa}$  como um parâmetro de qualidade de mudas, não é necessariamente correto afirmar quanto à relação “quanto maior  $L_{pa}$ , as mudas são de melhor qualidade”, pois em casos de mudas estioladas  $L_{pa}$  será maior e podem-se ter mudas de baixa adaptabilidade no sistema de produção. No entanto, a variável

$L_{pa}$  é importante por refletir a uniformidade das mudas (TITTONELL; DE GRAZIA; CHIESA, 2002).

#### **4.2.5.2.1. Analisando os níveis de Manejo dentro de Substrato**

Para as mudas produzidas com hidrogel, no início do ciclo (9° DAE e 11° DAE), não houve diferença entre os 4 manejos de irrigação. A partir do 15° DAE começou a se perceber diferenciação de modo que o manejo *timer* apresentou plantas mais altas ao fim do ciclo (tabela 8).

O manejo *timer* proporcionou irrigações com lâminas semelhantes aos manejos  $0,50ET_o$  e  $1,00ET_o$ , porém o número de eventos de irrigação em *timer* foi intermediário (tabela 8). Interpretando o manejo  $0,50ET_o$  como um manejo que aplica água com algum déficit e  $1,00ET_o$  como um manejo que disponibiliza mais água que *timer*, é possível que a combinação da distribuição dos eventos de irrigação ao longo do ciclo, no *timer*, tenha favorecido o equilíbrio de água e ar no substrato promovendo plantas mais altas.

As diferenças encontradas em avaliações intermediárias não foram consideradas importantes, pois não se mantiveram até o fim da fase de produção de mudas, logo não influenciam no padrão de qualidade do produto.

Para as mudas produzidas sem hidrogel: até o 22° DAE não houve diferença significativa entre os 4 manejos, apenas na avaliação final (25° DAE) na qual o manejo  $0,50ET_o$  favoreceu  $L_{pa}$  em relação aos manejos *timer* e  $K_c$ . O manejo  $1,00ET_o$  permaneceu com valores médios intermediários.

Esperava-se que as mudas produzidas com manejos que proporcionassem maior número de irrigações por dia (maior frequência de irrigação) ou maiores lâminas aplicadas (relacionadas a maiores valores de  $K_c$ ) fossem favorecer  $L_{pa}$ , mas este efeito não foi percebido no trabalho.

#### **4.2.5.2.2. Analisando os níveis Substrato dentro de Manejo**

Nota-se que no início (9° DAE e 11° DAE) a presença do hidrogel não promoveu diferenças no  $L_{pa}$ . Do 15° DAE adiante houve diferença significativa em

$L_{pa}$  e no substrato com hidrogel foram obtidas mudas mais altas, como evidenciado na Figura 16.

Este efeito foi observado empiricamente na casa de vegetação e a estatística obtida está de acordo. As equações de regressão para  $L_{pa}$  foram todos modelos lineares com  $\beta_1 > 0$ , portanto são retas crescentes ao longo do tempo (ver Anexo D, tabela 23), e possibilitam modelar bem o fenômeno observado, e também estimar a partir de qual dia do ciclo o uso do hidrogel passa a ser um diferencial na  $L_{pa}$  das mudas.

O efeito desta diferenciação se fez presente mais cedo nas mudas cultivadas com hidrogel (11° DAE) e nas mudas cultivadas sem hidrogel o efeito foi percebido mais tardio (22° DAE). Portanto, o uso do hidrogel tem efeito na precocidade das mudas. Este resultado que traduz um desenvolvimento vegetativo mais rápido na presença do hidrogel foi percebido por Tiftonell, de Grazia e Chiesa (2002) em plantas de pimentão.

Efeitos positivos da presença do hidrogel no substrato como maior disponibilidade de água e de nutrientes no substrato, podem explicar este desenvolvimento vegetativo diferenciado.

Navroski *et al.* (2016) e Bernardi *et al.* (2012) trabalharam com hidrogel na produção de mudas de eucalipto. Ambos aplicaram 6 g L<sup>-1</sup> de hidrogel e concluíram que ser possível reduzir a adubação rotineira em 25% 20%, respectivamente.

#### **4.2.5.3. Diâmetro do colo da muda (DC)**

O DC foi medido somente no 25° DAE, que corresponde ao último dia do ciclo de muda. O esquema da Análise de Variância (Anexo C, tabela 18) aponta que houve interação significativa entre Manejo e Substrato. O teste de médias de DC encontra-se na tabela 9.

**Tabela 9:** Valores médios de *DC* para produção de mudas na presença e ausência de hidrogel, sob diferentes manejos de irrigação.

	<i>DC</i> (mm)	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	2,74 Aa	1,79 Ab
<i>Kc</i>	2,64 Aa	1,65 Ab
<i>0,50 ETo</i>	2,30 Ba	1,92 Ab
<i>1,00 ETo</i>	2,78 Aa	1,70 Ab

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.2.5.3.1. Analisando os níveis de Manejo em Substrato

No substrato com hidrogel os manejos *timer*, *K<sub>c</sub>* e *1,00E<sub>T0</sub>* proporcionaram mudas com menor *DC* que o manejo *0,50E<sub>T0</sub>*. Para substrato sem hidrogel não houve diferença nas médias de *DC* entre os 4 manejos (Anexo C, tabela 18).

Apesar de na literatura não haver consenso sobre *DC* implicar diretamente em mudas de melhor qualidade, há referências de trabalhos correlacionando *DC* com produtividade em tomate (HERNÁNDEZ *et al.*, 2017) e trabalhos que associam *DC* com outras variáveis em cenários que implicam em mudas de boa qualidade (COSTA *et al.*, 2015).

#### 4.2.5.3.2. Analisando os níveis de Substrato dentro de Manejo

Para o substrato com hidrogel, o teste de médias (tabela 9) mostra que houve produção de mudas com maior *DC*, para todos os níveis de Manejo. Esse resultado sugere que água aplicada é mais bem aproveitada nas plantas cultivadas com hidrogel. Alguns autores apontam maiores valores de *DC* quando usado algum gel hidretentor no substrato ou solo, associado a efeitos de melhor uso da água e dos nutrientes pelas plantas (NAVROSKI *et al.*, 2016).

#### 4.2.5.4. Relação Parte Aérea/Diâmetro do Colo (*RPADC*)

O índice *RPADC* relaciona duas variáveis morfológicas:  $L_{pa}$  e  $DC$  da muda. Alto valor de *RPADC* pode indicar maior probabilidade de sobrevivência após o plantio no sistema de produção Stoeckler (1967) citado por (STURION; IEDE, 1982).

Mudas com  $L_{pa}$  maior e/ou  $DC$  menor apresentam *RPADC* maior. Se  $L_{pa}$  for baixo, *RPADC* será baixo. Trata-se de um índice útil para comparações entre níveis de um fator ou tratamentos distintos dentro de um mesmo experimento. Para comparações com outros experimentos, *RPADC* é um índice pouco objetivo, pois poucas diferenças no sistema de cultivo podem gerar variações grandes de um experimento para o outro tornando o índice menos objetivo.

Neste experimento, *RPADC* foi calculado com valores de  $L_{pa}$  e  $DC$  obtidos no 25° DAE (último dia do ciclo). A Análise de Variância encontrou diferença significativa ao nível de 5% na interação dos Manejos com Substratos (Anexo C, tabela 18).

Deve-se ter cuidado ao analisar este índice quanto a inferir sobre o desenvolvimento vegetativo de mudas, pois apenas este sozinho não reflete uma muda de qualidade. Melhores conclusões podem ser tiradas analisando outros índices ou variáveis conjuntamente, como as variáveis  $DC$ ,  $L_{pa}$  e  $MS_{pa}$ .

##### 4.2.5.4.1. Analisando os níveis de Manejo dentro de Substrato

Nas mudas cultivadas com hidrogel os manejos *timer* e  $0,50ET_0$  proporcionaram maiores valores de *RPADC* em relação aos manejos  $K_c$  e  $1,00ET_0$ .

Para os manejos no substrato puro não houve diferença significativa ao nível de 5% em *RPADC* (tabela 10).

##### 4.2.5.4.2. Analisando os níveis de Substrato dentro de Manejo

Comparando os substratos observa-se que o índice *RPADC* de mudas produzidas em substrato com hidrogel apresentou médias superiores aos sem hidrogel, para todos os 4 manejos (tabela 10). Este resultado sugere mudas mais altas

e/ou menos finas para o substrato com hidrogel. O mesmo padrão foi obtido em mudas de eucalipto (BERNARDI *et al.*, 2012).

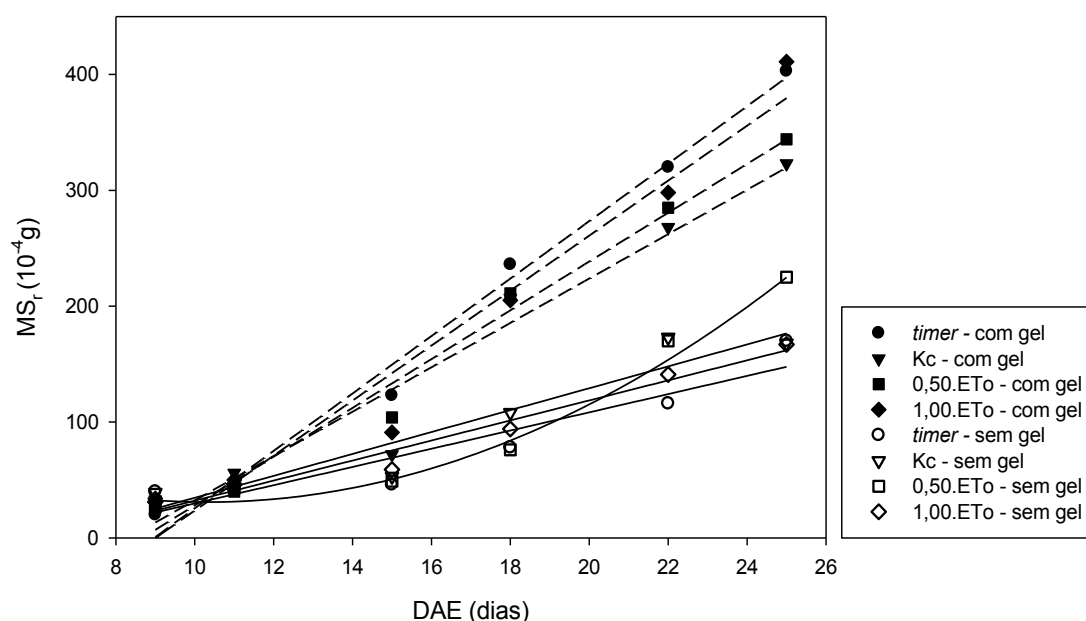
**Tabela 10:** Valores médios de *RPADC* para produção de mudas na presença e ausência de hidrogel, sob diferentes manejos de irrigação.

	<i>RPADC</i> (-)	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	55,33 Aa	35,92 Ab
<i>Kc</i>	47,03 Ba	35,02 Ab
<i>0,50 ETo</i>	55,05 Aa	41,79 Ab
<i>1,00 ETo</i>	46,65 Ba	40,05 Ab

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.2.5.5. Massa Seca do Sistema Radicular ( $MS_r$ )

A  $MS_r$  representa a massa acumulada nas raízes ao longo do tempo. Houve interação significativa entre os fatores Dia, Manejo e Substrato assim como entre Dia e Substrato. Porém não houve diferença significativa entre Manejo e Dia (Anexo C, tabela 20). As equações de regressão ajustadas (Anexo D, tabela 24).



**Figura 17:** Valores médios observados e regressões para Massa Seca de Raiz ao longo do ciclo de muda.

**Tabela 11:** Valores médios de Massa Seca Vegetal do Sistema Radicular ( $MS_r$ ) em  $10^{-4}$ g, na produção de mudas na presença e ausência de hidrogel, sob diferentes manejos de irrigação.

Manejo	9° DAE		11 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	20 Aa	40 Aa	41 Aa	42 Aa
<i>Kc</i>	33 Aa	39 Aa	56 Aa	44 Aa
<i>0,50 ETo</i>	26 Aa	27 Aa	40 Aa	43 Aa
<i>1,00 ETo</i>	34 Aa	31 Aa	50 Aa	46 Aa
Manejo	15° DAE		18 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	123 Aa	46 Ab	236 Aa	78 Ab
<i>Kc</i>	72 Aa	53 Aa	207 Aa	108 Ab
<i>0,50 ETo</i>	104 Aa	49 Aa	211 Aa	76 Ab
<i>1,00 ETo</i>	91 Aa	59 Aa	205 Aa	94 Ab
Manejo	22° DAE		25 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	320 Aa	116 Ab	403 Aba	170 Ab
<i>Kc</i>	268 Aa	173 Ab	323 Ba	168 Ab
<i>0,50 ETo</i>	285 Aa	170 Ab	344 Aba	225 Ab
<i>1,00 ETo</i>	298 Aa	141 Ab	411 Aa	167 Ab

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.2.5.5.1. Analisando os níveis de Manejo em Substrato

Não houve diferença significativa entre Manejo e Dia, ou seja, nenhum manejo favoreceu, ao longo do ciclo, o aumento da massa acumulada pelas raízes (tabela 11).

#### 4.2.5.5.2. Analisando os níveis de Substrato dentro de Manejo

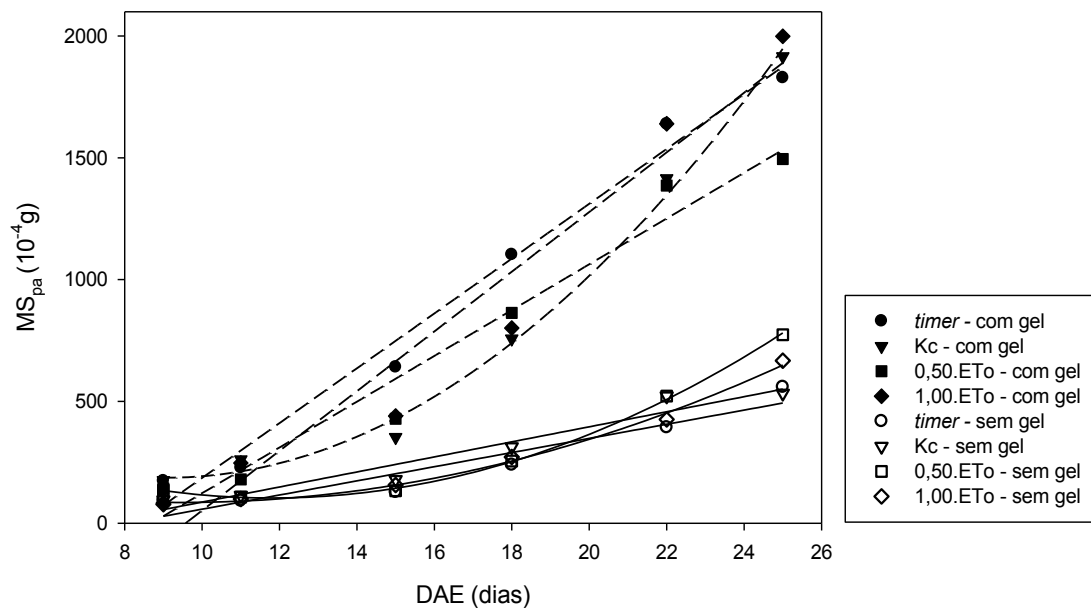
A partir do 15° DAE a  $MS_r$  com hidrogel foi superior à  $MS_r$  sem hidrogel para todos os manejos. Este resultado indica que houve maior desenvolvimento radicular no substrato com hidrogel (Figura 17). Este

desenvolvimento não está associado ao crescimento em profundidade ( $L_r$ ), o qual é limitado neste sistema de cultivo em bandejas, mas sim ao desenvolvimento de raízes adventícias. O desenvolvimento destas raízes foi associado como efeito positivo do uso de hidrogel em outros trabalhos na literatura (NAVROSKI *et al.*, 2016).

As raízes adventícias estão associadas com absorção da água, portanto mudas com maior quantidade destas raízes tendem a ter melhor resistência ao déficit hídrico. Esta é uma característica desejável ao transferir a muda para o local definitivo de produção.

#### 4.2.5.6. Massa Seca da Parte Aérea ( $MS_{pa}$ )

Esta variável apresentou na Análise de Variância interações significativas em Dia x Manejo x Substrato e também em Dia x Substrato, porém não houve interações significativas em Dia x Manejo (Anexo C, tabela 20).



**Figura 11:** Valores médios observados e regressões para Massa Seca de Parte Aérea ao longo do ciclo de muda.

**Tabela 12:** Valores médios de Massa Seca Vegetal de Parte Aérea ( $MS_{pa}$ ) em  $10^{-4}$ g, na produção de mudas na presença e ausência de hidrogel, sob diferentes manejos de irrigação.

Manejo	9° DAE		11 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	174 Aa	94 Aa	228 Aa	92 Aa
<i>Kc</i>	176 Aa	95 Aa	261 Aa	114 Aa
<i>0,50 ETo</i>	143 Aa	136 Aa	180 Aa	107 Aa
<i>1,00 ETo</i>	84 Aa	78 Aa	247 Aa	99 Aa
Manejo	15° DAE		18 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	641 Aa	128 Ab	1103 Aa	240 Ab
<i>Kc</i>	353 Aa	179 Aa	757 Aa	313 Ab
<i>0,50 ETo</i>	429 Aa	133 Ab	863 Aa	255 Ab
<i>1,00 ETo</i>	440 Aa	157 Aa	801 Aa	272 Ab
Manejo	22° DAE		25 ° DAE	
	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Ausência de hidrogel</i>
<i>Timer</i>	1639 Aa	393 Ab	1829 ABa	559 Ab
<i>Kc</i>	1415 Aa	522 Ab	1916 Aa	533 Ab
<i>0,50 ETo</i>	1386 Aa	522 Ab	1495 Ba	774 Ab
<i>1,00 ETo</i>	1640 Aa	426 Ab	1999 Aa	667 Ab

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

#### 4.2.5.6.1. Analisando os níveis de Manejo dentro de Substrato

Os diferentes níveis de Manejo de irrigação não influenciaram na  $MS_{pa}$  ao longo do ciclo (tabela 12), tanto na presença como na ausência de hidrogel.

Apenas no 25° DAE (substrato com hidrogel) houve diferença significativa quando  $0,50ETo$  produziu mudas com menor  $MS_{pa}$  comparadas a  $Kc$  e a  $1,00ETo$ . É possível que o efeito de aumento na retenção de água e nutrientes no substrato, promovido pelo hidrogel (FAGUNDES *et al.*, 2015), tenha diminuído a deficiência hídrica que seria imposta pelos diferentes tratamentos de manejo de irrigação. Somente na última avaliação do ciclo, na presença de hidrogel, o efeito do déficit

hídrico e os efeitos da deficiência nutricional começaram a incidir sobre as mudas, sendo percebido nas avaliações pela  $MS_{pa}$  e na casa de vegetação pelo aparecimento de leve coloração roxa nas mudas, típica de deficiência de fósforo.

#### **4.2.5.6.2. Analisando os níveis de Substrato dentro de Manejo**

No início do ciclo (até o 11° DAE) não houve diferença significativa entre presença e ausência de hidrogel na  $MS_{pa}$ . A partir do 15° DAE registrou-se o efeito do hidrogel na  $MS_{pa}$  e os valores médios foram superiores aos valores de  $MS_{pa}$  sem hidrogel (Figura 18).

As equações de regressão estão de acordo com o esperado de acordo com a literatura revisada, pois representam a  $MS_{pa}$  (massa acumulada) proporcional ao tempo de cultivo. Confirmam também que o hidrogel é um diferencial para obtenção de mudas com maior  $MS_{pa}$ , o que pode representar maior eficiência fotossintética, visto que o acúmulo da massa seca está diretamente ligado à assimilação de carbono pela fotossíntese (TAIZ; ZIEGER, 2004).

#### **4.2.5.7. Área da projeção da copa da planta sobre a bandeja ( $Ap$ )**

A  $Ap$  é uma variável que foi estimada, no 25° DAE, a partir da medição das dimensões de um retângulo que se encaixa nos pontos extremos das folhas da planta, quando projetada a copa desta sobre um plano cartesiano perpendicular ao caule da planta.

Deve-se ter em consideração que  $Ap$  não tem o propósito de refletir a área foliar da planta. A maneira como foi medida esta variável pode ser entendida como uma superestimativa da área projetada, mesmo assim é uma variável auxiliar na comparação de níveis de um fator dentro de um experimento e também é utilizada no cálculo do índice  $TPMS$ .

**Tabela 13:** Valores médios de Área da projeção da copa da planta sobre a bandeja ( $Ap$ ) em  $\text{dm}^2$ , na produção de mudas na presença e ausência de hidrogel.

<b>Substrato</b>	<b><math>Ap</math> (<math>\text{dm}^2</math>)</b>
<i>Presença de hidrogel</i>	1,20 a
<i>Ausência de hidrogel</i>	0,30 b

Médias seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

#### **4.2.5.7.1. Analisando os níveis de Substrato**

Nesse experimento a  $Ap$  foi avaliada somente para comparação do substrato nos níveis com hidrogel e sem hidrogel.  $Ap$  no substrato com hidrogel apresentou média superior ao substrato sem hidrogel. Esta diferença foi perceptível visualmente, pois as mudas no substrato com gel formaram folhas mais compridas (tabela 13).

A  $Ap$  pode indicar maior desenvolvimento de parte aérea, como possível consequência de plantas cultivadas com maior disponibilidade de água e de nutrientes devido à presença do hidrogel (NAVROSKI *et al.*, 2016). Por outro lado, pode indicar também plantas cultivadas em condições de sombreamento, em que as desenvolvem folhas mais longas, gerando valores superestimados para  $Ap$ , portanto deve-se avaliar  $Ap$  juntamente com outras variáveis morfológicas, como  $L_{pa}$ ,  $MS_{pa}$  e  $DC$ .

#### **4.2.5.8. Taxa de produção de matéria seca (TPMS)**

A  $TPMS$  é um índice com o objetivo de estimar a taxa média de acúmulo de matéria seca ao longo do tempo, entre duas medidas consecutivas, relacionada à área estimada da projeção da copa da planta.

Nesse experimento o índice foi estimado somente para comparação de níveis de substratos, ao fim da fase de muda. A  $TPMS$  foi estimada para as raízes ( $TPMS_r$ ), para parte aérea ( $TPMS_{pa}$ ) e para a planta inteira ( $TPMS_t$ ) (tabela 14).

**Tabela 14:** Valores da Taxa de Produção de Matéria Seca de raízes ( $TPMS_r$ ), de parte aérea ( $TPMS_{pa}$ ) e de planta inteira ( $TPMS_t$ ), em  $g\ m^{-2}\ dia^{-1}$ , na produção de mudas na presença e ausência de hidrogel no substrato.

Substrato	$TPMS_r$	$TPMS_{pa}$	$TPMS_t$
<i>Presença de hidrogel</i>	0,18 a	0,96 a	1,15 a
<i>Ausência de hidrogel</i>	0,32 b	1,03 a	1,35 a

Médias seguidas por uma mesma letra, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Para  $TPMS_r$  houve diferença significativa para o substrato. A média para substratos sem hidrogel apresentou valor superior ao valor com hidrogel. Para  $TPMS_{pa}$  e  $TPMS_t$  não houve diferença significativa entre os dois níveis de substrato (Anexo C, tabela 19).

Deve-se observar que a  $TPMS$  é um índice bastante sensível, independente a qual parte da planta é aplicada, e sofre grande influência da  $Ap$ . Nesse experimento os valores de  $Ap$  foram mais altos para mudas com hidrogel (tabela 14), e os valores de  $MS_r$  são baixos em relação aos de parte aérea. Provavelmente por isso as plantas produzidas em hidrogel apresentaram baixos valores para  $TPMS_r$ , em relação às plantas sem hidrogel. Para  $TPMS_{pa}$  e  $TPMS_t$ , como os valores de massa seca são maiores, não foram detectadas diferenças significativas ao nível de 5% (Anexo C, tabela 19).

Trata-se de um índice muito sensível, e deve-se ter bastante controle experimental ao utilizá-lo para inferir sobre qualidade morfológica de mudas.

#### 4.2.5.9. Taxa de Crescimento Relativo ( $TCR$ )

A  $TCR$  é um índice que relaciona, em escala logarítmica, a variação da massa seca obtida no intervalo entre duas avaliações (equação 31), e está diretamente correlacionado ao desenvolvimento vegetativo, principalmente, da parte aérea de plantas (LUCHESE, 1984). Neste experimento a primeira avaliação foi no 9º DAE e a última 25º DAE, compondo 16 dias como intervalo temporal. A ideia da  $TCR$  é estimar, em  $mg\ dia^{-1}$ , a massa seca acumulada pelas plantas. Trata-se de um índice interessante para comparar tratamentos de um experimento e pode ser calculado para raízes ( $TCR_r$ ), para parte aérea ( $TCR_{pa}$ ) ou para a planta como um todo ( $TCR_t$ ).

Esse procedimento foi realizado nesse experimento. Uma vantagem deste índice sobre a *TPMS* é que a *TCR* não considera a área da planta no cálculo, portanto isso é menos sensível a erros experimentais, como por exemplo, obtenção de valores superestimados de *Ap*.

A Análise de variância apontou que não há diferença significativa de interação entre Manejos e Substratos, para  $TCR_r$ ,  $TCR_{pa}$  ou  $TCR_t$  (Anexo C, tabela 21). Logo, os fatores foram estudados separadamente (tabelas 15 e 16).

Visando facilitar a compreensão do texto, a discussão sobre *TCR* será feita em tópicos divididos em  $TCR_r$ ,  $TCR_{pa}$  e  $TCR_t$ .

**Tabela 15:** Valores médios da Taxa de Crescimento Relativo de raízes ( $TCR_r$ ), parte aérea ( $TCR_{pa}$ ) e de planta inteira ( $TCR_t$ ), em  $\text{mg dia}^{-1}$ , para a produção de mudas em diferentes de manejos de irrigação.

Manejos	$TCR_r$	$TCR_{pa}$	$TCR_t$
<i>Timer</i>	0,37 a	0,11 b	0,10 b
<i>Kc</i>	0,16 a	0,11 b	0,10 b
<i>0,50 ETo</i>	0,29 a	0,11 b	0,11 b
<i>1,00 ETo</i>	0,20 a	0,14 a	0,12 a

Médias seguidas por uma mesma letra, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

**Tabela 16:** Valores médios da Taxa de Crescimento Relativo de raízes ( $TCR_r$ ), parte aérea ( $TCR_{pa}$ ) e de planta inteira ( $TCR_t$ ), em  $\text{mg dia}^{-1}$ , para a produção de mudas na ausência e presença de hidrogel.

Substrato	$TCR_r^{ns}$	$TCR_{pa}^*$	$TCR_t^*$
<i>Presença de hidrogel</i>	0,32 a	0,12 a	0,12 a
<i>Ausência de hidrogel</i>	0,19 a	0,11 b	0,10 b

Médias seguidas por uma mesma letra, para cada variável, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

#### 4.2.5.9.1. Taxa de Crescimento Relativo de raízes ( $TCR_r$ )

As raízes não apresentaram diferenças significativas entre níveis dos fatores Manejo, tampouco em Substrato. Logo, este índice sugere que o crescimento

radicular tenha se dado à mesma taxa, para todos os tratamentos experimentais (tabelas 15 e 16). A ausência de diferenças para este índice entre os diversos tratamentos é aceitável, pois as bandejas apresentavam impedimentos físicos, logo não era esperado livre desenvolvimento radicular. No entanto, a  $TCR_r$  positiva sugere que houve desenvolvimento radicular na fase estudada. O desenvolvimento observado está relacionado ao desenvolvimento de raízes adventícias, evidenciado pelos resultados crescentes de  $MS_r$  (ver 4.2.5.5 deste trabalho).

#### **4.2.5.9.2. Taxa de Crescimento Relativo da parte aérea ( $TCR_{pa}$ )**

Para a parte aérea houve diferença significativa para ambos os fatores Manejo e Substrato. Não houve interação significativa entre Manejo e Substrato (Anexo C, tabela 21).

Dos níveis de Manejo, a  $TCR_{pa}$  do manejo 1,00 $ET_0$  foi maior que a  $TCR_{pa}$  dos outros manejos (tabela 15). Essa taxa resulta em variações médias diárias da massa seca acumulada, diferentemente da análise de  $MS_{pa}$  para os dias amostrados. Este manejo apresentou destaque pela  $TCR_{pa}$  mas não o apresentou pela análise da variável  $MS_{pa}$  isoladamente.

A  $TCR_{pa}$  para mudas cultivadas com hidrogel representou maior taxa de acúmulo de matéria seca que o nível sem hidrogel (tabela 16). De forma análoga ao que foi argumentado para  $MS_{pa}$  (ver 4.2.5.6.2 deste trabalho), o hidrogel se mostrou um diferencial na produção de mudas, pelo índice  $TCR_{pa}$ .

#### **4.2.5.9.3. Taxa de Crescimento Relativo da planta inteira ( $TCR_t$ )**

Diferenças significativas foram encontradas para ambos os fatores Manejo e Substrato, porém sem interação significativa entre eles (Anexo C, tabela 21).

A  $TCR_t$  de mudas produzidas com hidrogel representou maior acúmulo de matéria seca (tabela 16), em relação às mudas cultivadas sem hidrogel. Estes resultados estão de acordo com a  $TCR_{pa}$  que foi a parte da planta responsável pela

diferença significativa na  $TCR_{pa}$  nestas condições de cultivo, visto que as raízes não apresentaram diferenças de médias. No geral, a  $TCR_t$  mostra que as plantas se desenvolveram melhor vegetativamente no substrato com gel, o que era esperado considerando as propriedades dos hidrogéis relatadas em na literatura.

Dentre os níveis de Manejo,  $1,00ET_o$  proporcionou maior média de  $TCR_t$  (tabela 15). Esta maior taxa de crescimento em relação aos demais, representando melhores condições para o acúmulo de massa seca nas mudas de tomate. Entende-se que os manejos *timer* e  $0,50ET_o$  podem ter proporcionado algum déficit hídrico, possivelmente em horários com temperaturas mais altas. Nestes horários os estômatos foliares se fecham, reduzindo a fixação de carbono (TAIZ; ZIEGER, 2004).

## 5. CONCLUSÕES

- Na fase mudas o  $K_c$  é maior para plantas cultivadas em substrato com hidrogel;
- O uso do hidrogel proporcionou mudas de tomate mais precoces, com maior altura final, maior diâmetro de colo, maior acúmulo de massa seca de parte aérea, maior área de projeção da copa e maior a Taxa de Crescimento Relativo de parte aérea;
- O sistema radicular foi fisicamente limitado pela bandeja no crescimento em comprimento.
- Houve efeito positivo do hidrogel no acúmulo de massa seca radicular por desenvolvimento de raízes adventícias.
- Os manejos de irrigação aplicados não influenciaram as mudas produzidas sem hidrogel;
- O manejo  $0,50 ET_0$  no cultivo com hidrogel produziu mudas mais altas, colo mais fino e menor massa seca de parte aérea.
- O manejo  $1,00 ET_0$  no cultivo com hidrogel promoveu maior Taxa de Crescimento Relativo de parte aérea.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDI-KOUPAI, J.; SOHRAB, F.; SWARBRICK, G.. Evaluation of Hydrogel Application on Soil Water Retention Characteristics. **Journal of Plant Nutrition** v. 31, n. 2, p. 317–331, 2008.
- ABEDINPOUR, M.. Evaluation of growth-stage-specific crop coefficients of maize using weighing lysimeter. **Soil and Water Research** v. 10, n. 2, p. 99–104, 2015.1801-5395.
- AHMED, E. M.. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. **Journal of Advanced Research** v. 6, n. 2, p. 105–121, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>>.2090-1232. 2090-1224.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M.. **FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.**, 1998.
- ANALOG DEVICES. *Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier AD620*. Disponível em: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>>, 2011
- AOSONG. *Temperature and humidity module AM2302 Product Manual*. Disponível em: <[www.aosong.com](http://www.aosong.com)>, 2016
- BARBOSA, T. C.; RODRIGUES, R. R.; COUTO, H. T. Z. De.. Tamanhos de recipientes e o uso de hidrogel no estabelecimento de mudas de espécies florestais nativas. **Hoehnea** v. 40, n. 3, p. 537–556, 2013.
- BERNARDI, M. R.; SPEROTTO, J. M.; OMAR, D.; VITORINO, A. C. T.. Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. **Cerne** v. 18, n. 1, p. 67–74, 2012.
- BERNARDO, Salassier; SOARES, Antônio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. *Manual de Irrigação*. 8. ed..Viçosa: editora UFV, 2006.
- BUZETTO, F. A.; BIZON, J. M. C.; SEIXAS, F.. Avaliação de polímero adsorvente à base de acrilamida no fornecimento de água para mudas de *Eucalyptus urophylla*. **Circular Técnica IPEF** v. 195, n. September, p. 1–5, 2002.
- CERQUEIRA, F. B.; FREITAS, G. A. de; SANDI, F.; CARNEIRO, J. S. da S.; GIACOMINI, I.; NERES, J. C. I.. Substratos e recipientes no desenvolvimento de mudas de pepino em alta temperatura. **Global Science and Technology** v. 8, n. 2, p. 61–73, 2015.
- CHAPPELL, M.; DOVE, S. K.; VAN IERSEL, M. W.; THOMAS, P. A.; RUTER, J.. Implementation of Wireless Sensor Networks for Irrigation Control in Three Container Nurseries. **Horttechnology** v. 23, n. December, p. 747–753, 2013.
- COSTA, E.; LEAL, P. A. M.; BENNET, C. G. S.; BENNET, K. S. S.; SALAMENE, L. C. P.. Production of Tomato Seedlings Using Different Substrates and trays in three protected environments. **Eng. Agríc., Jaboticabal** v. 32, n. 5, p. 822–830, 2012.
- COSTA, E.; DURANTE, L. G. Y.; NAGEL, P. L.; FERREIRA, C. R.; DOS SANTOS, A.. Qualidade de mudas de berinjela submetida a diferentes métodos de produção. **Ciência Agronômica** v. 42, n. 4, p. 1017–1025, 2011.

DA SILVA, A. O.; KLAR, A. E.; SILVA, E. F. de F.; CUNHA, A. R.. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo para a beterraba sob estresse salino em ambiente protegido. **Irriga** v. 19, n. 3, p. 375–389, 2014.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop Water Requirements**, 1977.

DRANSKI, J. A. L.; JUNIOR, A. S. P.; CAMPAGNOLO, M. A.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M.. Sobrevivência e crescimento do pinhão-manso em função do método de aplicação e formulações de hidrogel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n. 5, p. 537-542, 2013.

FAGUNDES, M. C. P.; CRUZ, M. do C. M.; DE CARVALHO, R. P.; OLIVEIRA, J.; SOARES, B. C.. Polímero hidroabsorvente na redução de nutrientes lixiviados durante a produção de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Revista Caatinga** v. 28, n. 1, p. 121–129, 2015.

GALEŞ, D. C.; TRINCA, L. C.; CAZACU, A.; PEPTU, C. A.; JITAREANU, G.. Effects of a hydrogel on the cambic chernozem soil's hydrophysic indicators and plant morphophysiological parameters. **Geoderma** v. 267, p. 102–111, 2016.

GERVÁSIO, E. S.; FRIZZONE, J. A. Caracterização Físico-Hídrica de um condicionador de solo e seus efeitos quando misturado a um substrato orgânico. **Irriga** v. 9, n. 2, p. 94–105, 2004.

GUPTA, M. K.; SAMUEL, D. V. K; SIROHI, N. P. S. Decision support system for greenhouse seedling production. **Computers and Electronics in Agriculture** v. 73, n. 2, p. 133–145, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.05.009>> 0168-1699.

HERNÁNDEZ, H. H.; MENDOZA, A. B.; ORTIZ, H. O.; FUENTES, A. D. H.; MALDONADO, H. O.. Cu Nanoparticles in chitosan-PVA hydrogels as promoters of growth , productivity and fruit quality in tomato. **Emirates Journal of Food and Agriculture** v. 29, n. 8, p. 573–580, 2017.

HUNT, R. **Plant Growth Curves: The Functional Approach to Plant Growth Analysis**. 1982.

INCROCCI, L.; MARZIALETTI, P.; INCROCCI, G.; DI VITA, A.; BALENDONCK, J.; BIBBIANI, C.; SPAGNOL, S.; PARDOSSI, A. Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops. **Agricultural Water Management** v. 131, p. 30–40, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.004>>.

JÚNIOR, J. C. F. DE M.; COSTA, D. S.; GERVÁRIO, E. S.; LIMA, A. M. N.; SEDIYAMA, G. C.. Efeito de níveis de depleção de água no substrato e doses de fertilizante de liberação controlada na produção de mudas de maracujazeiro amarelo. **Irriga** v. 20, n. 2, p. 204–219, 2015.

KUMARAN, S. S.. Optimizing the strength of hydrophilic polymers on yield and its contributing traits in tomato. **International Journal of Applied and Pure Science and Agriculture** v. 2, p. 61–66, 2016.

LONDRA, P.A.; PARASKEVOPOULOU, A.T.; PSYCHOYOU, M.. Evaluation of water-air balance of various substrates on Begonia growth. **HortScience** v. 47, n. 8, p. 1153–1158, 2012.

LOPES, J. L. W.; DA SILVA, M. R.; SAAD, J. C. C.; ANGÉLICO, T. D. S. Uso de hidrogel na sobrevivência de mudas de eucalyptus urograndis produzidas com

diferentes substratos e manejos hídricos. **Ciencia Florestal** v. 20, n. 2, p. 217–224, 2010.

LUCHESE, A.A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz** v. 41, n. 1, p. 181–202, 1984. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0071-12761984000100011&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0071-12761984000100011&lng=pt&nrm=iso&tlng=en)>.

MARIA H. F.. **Métodos De Análise Para Caracterização Física De Substratos Para Plantas**. 2003.

MARQUES, P. A. A.; BASTOS, R. O.. Uso de diferentes doses de hidrogel para produção de mudas de pimentão. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia** v. 3, n. 2, p. 53–58, 2010.

MARQUES, P. A. A.; CRIPA, M. A. de M.; MARTINEZ, E. H.. Hidrogel como substituto da irrigação complementar em viveiro telado de mudas de cafeeiro. **Ciênc. rural** v. 43, n. 1, p. 1–7, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&amp%5Cnpid=S0103-84782013000100001](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&amp%5Cnpid=S0103-84782013000100001)>.

MARTINS, C. C.; BOVI, M. L. A.; SPIERING, S. H.. Umedecimento do substrato na emergência e vigor de plântulas de pupunheira. **Revista Brasileira de Fruticultura** v. 31, n. 1, p. 224–230, 2009.

MATSUDA, R.; OZAWA, N.; FUJIWARA, K.. Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences. **Scientia Horticulturae** v. 170, p. 150–158, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.014>>.0304-4238.

NAVROSKI, M. C.; ARAÚJO, M. M.; CUNHA, F. S.; BERGHETTI, A. L. P.; PEREIRA, M. O.. Redução da adubação e melhoria das características do substrato com o uso do hidrogel na produção de mudas de *Eucalyptus dunii* Maiden. **Ciência Florestal** v. 26, n. 4, p. 1155, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/25106>>.

OLSZEWSKI, M. W.; GOLDSMITH, R. S.; GUTHRIE, E. K.; YOUNG, C. A. Use of sieved compost plus hydrogel for solid matrix priming of carrot seeds. **Compost Science and Utilization** v. 20, n. 1, p. 5–10, 2012. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84859794841&partnerID=tZOtx3y1>>.

PREVEDELLO, C. L.; LOYOLA, J. M. T.. Efeito De Polímeros Hidroretentores Na Infiltração Da Água No Solo. **Scientia Agraria** v. 8, n. 3, p. 313–317, 2007.

REGHIN, M. Y.; OTTO, R. F.; OLINIK, J. R.; JACOBY, C. F. S.. Viabilidade do sistema de produção de mudas em bandejas em três cultivares de cebola. **Ciência e Agrotecnologia** v. 31, n. 4, p. 1075–1084, 2007.

RODRIGUES, S. B.. **Análise Do Uso De Água Em Unidades De Produção De Mudas De Eucalipto**. 2007.

SANTOS, H. T. D.; CARVALHO, D. F. D.; SOUZA, C. F.; MEDICI, L. O.. Cultivo de alface em solos com hidrogel utilizando irrigação automatizada. **Revista Engenharia Agrícola** v. 35, n. October, p. 852–862, 2015.

SARVAŠ, M.; PAVLENDÁ, P.; TAKÁCOVÁ, E. Effect of hydrogel application on survival and growth of pine seedlings in reclamations. **Journal of Forest Science** v.

53, n. 5, p. 204–209, 2007.

SNYDER, R. L.. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **J. Irrig. Drain Eng** v. 118, n. 6, p. 977–980, 1992.

STEIDLE NETO, A. J.. Sistema computadorizado para preparo e aplicação de soluções nutritivas com base na estimativa da transpiração do tomateiro cultivado em casa de vegetação. 2007. 101 p.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S.; LOPES, D. de C. Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. **Computers and Electronics in Agriculture** v. 103, p. 17–25, 2014.

STURION, J. A.; IEDE, E. T.. **Cobertura do Canteiro e Sombreamento na Formação de Mudas de Ocotea porosa (NEES) LIBERATO BARROSO (Imbuia)**, 1982.

TAIZ, Lincoln.; ZIEGER, Eduardo.. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p..

TATAGIBA, S. D.; XAVIER, T. M. T.; TORRES, H.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S.. Determinação da máxima capacidade de retenção de água no substrato para produção de mudas de eucalipto em viveiro. **Floresta** v. 45, n. 4, p. 745–754, 2015.

TITTONELL, P. A.; DE GRAZIA, J.; CHIESA, A.. Adición de polímeros superabsorbentes en el medio de crecimiento para la producción de plantines de pimiento. **Horticultura Brasileira** v. 20, p. 641–645, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-05362002000400026&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362002000400026&nrm=iso)>. 0102-0536.

TOHIDI-MOGHADAM, H. R.; SHIRANI-RAD, A. H.; NOUR-MOHAMMADI, G.; HABIBI, D.; MODARRES-SANAVY, S. A. M.; MASHHADI-AKBAR-BOOJAR, M.; DOLATABADIAN, A.. Response of six oilseed rape genotypes to water stress and hydrogel application. **Pesquisa Agropecuária Tropical** v. 39, n. 3, p. 243–250, 2009.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, R.; PERONI, L.; GODINHO, T. O.. Estercos de origem animal em substratos para a produção de mudas florestais: atributos físicos e químicos. **Scientia Forestalis** v. 40, n. 96, p. 455–462, 2012. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/leitura.asp?Article=03&Number=96>>.

WALKER, J. N.; ALDRICH, R. A.; SHORT, T. H. Quantity of air flow for greenhouse structures. **Ventilation of Agricultural Structures** p. 169 – 191, 1983.

WOODHOUSE, J.; JOHNSON, M. S.. Effect of superabsorbent polymers on survival and growth of crop seedlings. **Agricultural Water Management** v. 20, n. 1, p. 63–70, 1991.

ZOLNIER, S.; GATES, R. S.; BUXTON, J.; MACH, C.. Psychometric and ventilation constraints for vapor pressure deficit control. **Computers and Electronics in Agriculture** v. 26, n. 3, p. 343–359, 2000.0168-1699.

## ANEXOS

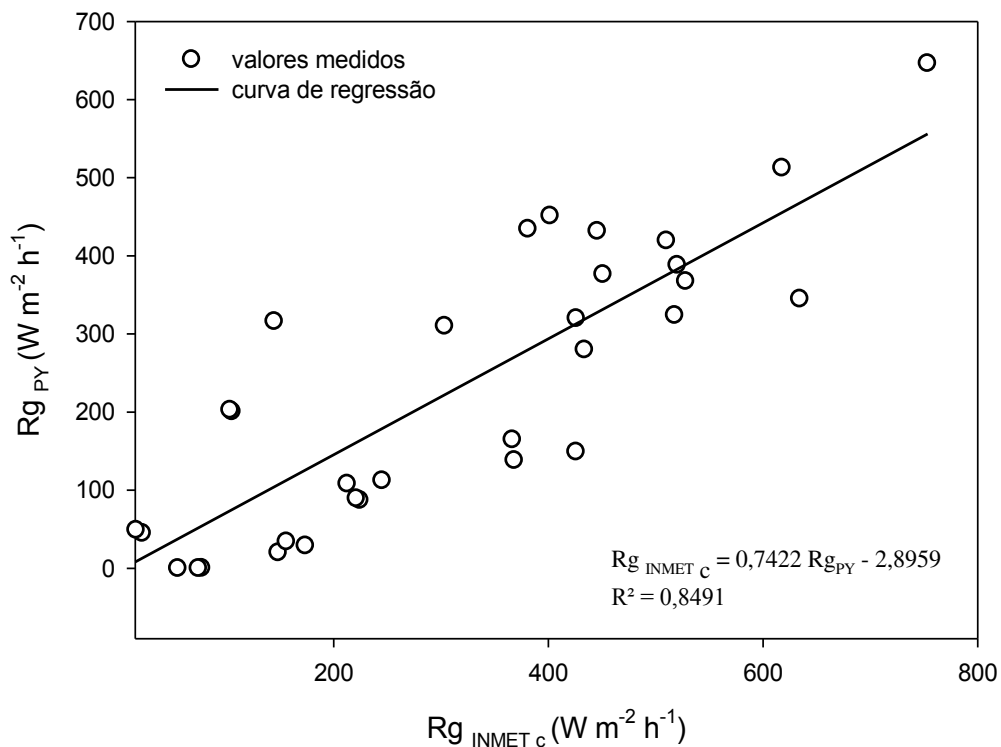
### ANEXO A: Calibração do piranômetro (PY42792)

Usou-se uma resistência  $R_{ganho} = 0.3004 \text{ K}\Omega$ , e o ganho foi um sinal amplificado 165,5 vezes.

Com a calibração do piranômetro foi possível conhecer a relação entre as leituras com o PY42792 e o sensor adotado como padrão, nesse caso, o sensor da estação automática do INMET – que foi previamente calibrado com um piranômetro modelo CMP6 (Kipp & Zonen B.V.Delft, The Netherlands).

O modelo linear utilizado foi o da Eq. 34, como na figura 19.

$$Rg_{PY} = -2,8959 + 0,7422 \cdot Rg_{INMETc} \quad (\text{Eq. 34})$$



**Figura 19:** Curva de calibração do PY42792 com ajuste linear.

Logo, a equação de correção incorporada ao código do programa do Arduino para as leituras de radiação global é:

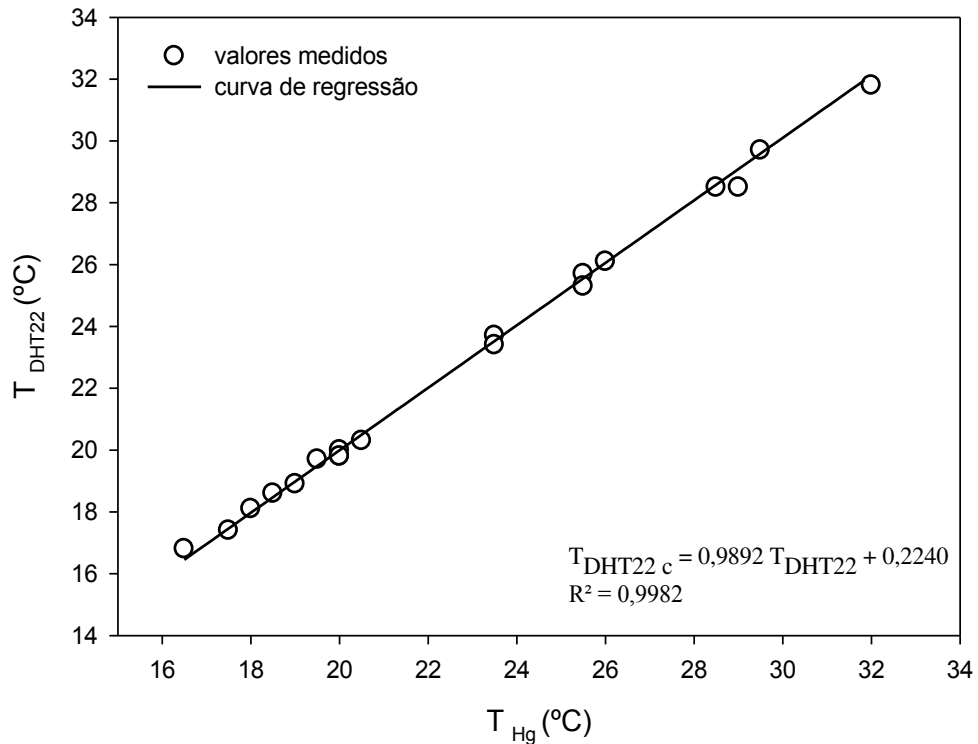
$$Rg_{PYc} = \frac{(Rg_{PY} + 2,8959)}{0,7422} \quad (\text{Eq. 35})$$

A regressão foi obtida com 72 pontos e apresenta  $R^2 = 0,8491$  no intervalo de  $Rg_{PY} = (0 ; 645) \text{ W m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .

## ANEXO B: Calibração do sensor de temperatura do ar (DHT22)

O sensor DHT22 foi calibrado somente para a temperatura do ar, por meio de regressão simples com modelo linear (Eq. 36), como na figura 20.

$$T_{obs\ DHT22} = 0,2240 + 0,9892 \cdot T_{obs\ Hg} \quad (\text{Eq. 36})$$



**Figura 20:** Curva de calibração do DHT22 com ajuste linear para temperatura do ar.

A regressão foi obtida com 19 pontos e apresenta  $R^2 = 0,9982$  no intervalo de  $T_{obs\ DHT22} = (16,5 ; 32,0)^\circ\text{C}$ .

Logo, a equação de correção incorporada ao código do programa do Arduino para as leituras de temperatura do ar foi a Eq. 37.

$$T_{cor\ DHT22} = \frac{(T_{obs\ DHT22} - 0,2240)}{0,9892} \quad (\text{Eq. 37})$$

**ANEXO C: Resumo das Análises de Variância de variáveis e índices estudados neste trabalho.**

**Tabela 17:** Resumo da Análise de Variância das variáveis  $L_r$  e  $L_{pa}$ .

F.V.	G.L.	Q.M.	
		$L_r$	$L_{pa}$
Manejo (M)	3	6,4694 <sup>ns</sup>	7,1556 *
Subs (S)	1	3,7129 <sup>ns</sup>	446,5200 *
M x S	3	3,2261 <sup>ns</sup>	6,7057 *
Res (a)	24	2,8387	0,5131
Dia	5	114,2716 *	245,9035 *
Dia x M	15	4,8427 *	0,6667 *
Dia x S	5	11,0444 *	54,5943 *
Dia x M x S	15	2,8681 <sup>ns</sup>	1,5330 *
Res (b)	120	2,3639	0,3285
C.V. Parcela (%)		16,10	11,16
C.V. Subpar, (%)		14,68	8,92

F – \* significativo a 5%,<sup>ns</sup> não significativo.

**Tabela 18:** Resumo da Análise de Variância da variável DC e do índice RPADC.

F.V.	G.L.	Q.M.	
		DC	RPADC
Manejo (M)	3	0,0456 <sup>ns</sup>	80,0059 *
Subs (S)	1	5,7800 *	1314,3830 *
M x S	3	0,2072 *	55,2538 *
Resíduo	24	0,0355	15,5071
C.V. (%)		8,58	8,82

F – \* significativo a 5%,<sup>ns</sup> não significativo.

**Tabela 19:** Resumo da Análise de Variância da variável  $Ap$  e dos índices  $TPMS_r$ ,  $TPMS_{pa}$  e  $TPMS_t$ .

F.V.	G.L.	Q.M.			
		$Ap$	$TPMS_r$	$TPMS_{pa}$	$TPMS_t$
Subs (S)	1	1,6263 *	0,0381 *	0,0095 <sup>ns</sup>	0,0860 <sup>ns</sup>
Resíduo	6	0,1693	0,0025	0,0377	0,0555
C.V. (%)		43,43	19,70	19,44	18,77

F – \* significativo a 5%,<sup>ns</sup> não significativo.

**Tabela 20:** Resumo da Análise de Variância das variáveis  $MS_r$  e  $MS_{pa}$ .

F.V.	G.L.	Q.M.	
		$MS_r$	$MS_{pa}$
Manejo (M)	3	562,9410 <sup>ns</sup>	31248,28 <sup>ns</sup>
Subs (S)	1	331835,0 *	0,1476994E+8 *
M x S	3	5338,413 *	140194,8 *
Res (a)	24	1938,101	39646,72
Dia	5	321215,4 *	6626976 *
Dia x M	15	873,4024 <sup>ns</sup>	20116,41 <sup>ns</sup>
Dia x S	5	51325,26 *	1825390 *
Dia x M x S	15	1926,348 *	48664,20 *
Res (b)	120	978,7851	24803,54
C.V. Parcela (%)		32,91	35,26
C.V. Subpar, (%)		23,38	27,89

F – \* significativo a 5%, <sup>ns</sup> não significativo.

**Tabela 21:** Resumo da Análise de Variância dos índices  $TCR_r$ ,  $TCR_{pa}$  e  $TCR_t$ .

F.V.	G.L.	Q.M.		
		$TCR_r$	$TCR_{pa}$	$TCR_t$
Manejo (M)	3	0,0734 <sup>ns</sup>	0,0017 *	0,0007 *
Subs (S)	1	0,1400 <sup>ns</sup>	0,0008 *	0,0011 *
M x S	3	0,1101 <sup>ns</sup>	0,0003 <sup>ns</sup>	0,0001 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	0,0524	0,0001	0,0001
C.V. (%)		88,26	10,39	9,27

F – \* significativo a 5%, <sup>ns</sup> não significativo.

**ANEXO D: Modelos de regressão ajustados para as variáveis estudadas neste trabalho.**

**Tabela 22:** Modelos de regressão para  $L_r$  – Comprimento radicular (cm).

<i>Substrato</i>	<i>Manejo</i>	<i>Eq. Ajustada</i>	$R^2$
<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\hat{L}_r = 1,3581 + 0,5571*dia$	0,9675
	<i>Kc</i>	$\hat{L}_r = 4,0448 + 0,3530*dia$	0,9211
	<i>0,50 ETo</i>	$\hat{L}_r = -2,8112 + 1,3506*dia - 0,0321*dia^2$	0,9663
	<i>1,00 ETo</i>	$\hat{L}_r = 6,3325 + 0,2801*dia$	0,8016
<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\hat{L}_r = 5,2252 + 0,3296*dia$	0,9261
	<i>Kc</i>	$\hat{L}_r = 7,0271 + 0,2242*dia$	0,8785
	<i>0,50 ETo</i>	$\hat{L}_r = 5,3732 + 0,2943*dia$	0,7453
	<i>1,00 ETo</i>	$\hat{L}_r = 10,66$	-

\* - Significativo ao nível de 5% pelo teste t.

**Tabela 23:** Modelos de regressão para  $L_{pa}$  – Comprimento de Parte Aérea (cm).

<i>Substrato</i>	<i>Manejo</i>	<i>Eq. Ajustada</i>	$R^2$
<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\hat{L}_{pa} = -3,6355 + 0,7452*dia$	0,9876
	<i>Kc</i>	$\hat{L}_{pa} = -2,6786 + 0,5865*dia$	0,9780
	<i>0,50 ETo</i>	$\hat{L}_{pa} = -2,3157 + 0,6258*dia$	0,9561
	<i>1,00 ETo</i>	$\hat{L}_{pa} = -3,0088 + 0,6471*dia$	0,9909
<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\hat{L}_{pa} = 1,3088 + 0,2072*dia$	0,9203
	<i>Kc</i>	$\hat{L}_{pa} = 0,9629 + 0,2235*dia$	0,8631
	<i>0,50 ETo</i>	$\hat{L}_{pa} = 0,7866 + 0,2721*dia$	0,9214
	<i>1,00 ETo</i>	$\hat{L}_{pa} = 0,9131 + 0,2332*dia$	0,9947

\* - Significativo ao nível de 1% pelo teste t.

**Tabela 24:** Modelos de regressão para  $MS_r$  – Massa da Matéria Seca Vegetal do Sistema Radicular ( $10^{-4}$ g).

<i>Substrato</i>	Manejo	Eq. ajustada	$R^2$
<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\widehat{MS}_r = -222,39 + 24,79*dia$	0,9886
	<i>Kc</i>	$\widehat{MS}_r = -159,14 + 19,15*dia$	0,9460
	<i>0,50 ETo</i>	$\widehat{MS}_r = -182,47 + 21,05*dia$	0,9823
	<i>1,00 ETo</i>	$\widehat{MS}_r = -213,73 + 23,73*dia$	0,9558
<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\widehat{MS}_r = -48,82 + 7,86*dia$	0,8791
	<i>Kc</i>	$\widehat{MS}_r = -59,83 + 9,45*dia$	0,9109
	<i>0,50 ETo</i>	$\widehat{MS}_r = 126,81 - 18,58*dia + 0,90*dia^2$	0,9864
	<i>1,00 ETo</i>	$\widehat{MS}_r = -54,34 + 8,65*dia$	0,9686

\* - Significativo ao nível de 5% pelo teste t.

**Tabela 25:** Modelos de regressão para  $MS_{pa}$  – Massa da Matéria Seca Vegetal de Parte Aérea ( $10^{-4}$  g).

<i>Substrato</i>	Manejo	Eq. ajustada	$R^2$
<i>Presença de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\widehat{MS}_{pa} = -939,70 + 112,55*dia$	0,9842
	<i>Kc</i>	$\widehat{MS}_{pa} = 758,09 - 125,94*dia + 6,94*dia^2$	0,9942
	<i>0,50 ETo</i>	$\widehat{MS}_{pa} = -817,06 + 94,00*dia$	0,9654
	<i>1,00 ETo</i>	$\widehat{MS}_{pa} = -1173,37 + 122,53*dia$	0,9483
<i>Ausência de hidrogel</i>	<i>Timer</i>	$\widehat{MS}_{pa} = -232,94 + 29,05*dia$	0,9061
	<i>Kc</i>	$\widehat{MS}_{pa} = -222,25 + 30,90*dia$	0,9473
	<i>0,50 ETo</i>	$\widehat{MS}_{pa} = 645,47 - 91,83*dia + 3,89*dia^2$	0,9990
	<i>1,00 ETo</i>	$\widehat{MS}_{pa} = 295,23 - 44,34*dia + 2,34*dia^2$	0,9947

\* - Significativo ao nível de 5% pelo teste t.

## ANEXO E: Código fonte do programa utilizado na Fase 1 do trabalho.

```
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
#include "DHT.h"
#include <math.h>
#include <virtuabotixRTC.h>
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
#define relePin 3 // Pino do rele da
valvula
#define releBomba 1 // Pino do rele da
bomba
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

int CS_PIN = 10; //CS = chip select
pin
// obs.: o long só armazena informação
no máximo 50 dias, após é necessário
reiniciar o arduino.
unsigned long t_previo,
t_previo_bomba = 0;
unsigned long tempo_medida =
300000; // 5 min para cada medida
unsigned long tempo_bomba = 60000;
// 1 min para a bomba ligada (+ 10 seg
da faixa), colocar sempre um numero
inteiro, sem multiplicacao)
int unsigned tc[8];
int n = 0, z = 1;
const float kc[8] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1}; // constantes do kc
const float DMP[8] = {10, 10, 10, 10,
10, 10, 10, 10};
const float Ia[8] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
1};
bool resposta[8] = {false, false, false,
false, false, false, false, false};

float eficiencia = 0.90;

virtuabotixRTC myRTC(7, 8, 9); //
myRTC(clock, data, rst)

String nome;
char txt;

// funcoes utilizadas
unsigned int tempo_segundo(int h, int
m, int s) {
return h * 3600 + m * 60 + s;
}
// fim das funcoes utilizadas

unsigned int tempo_funcionamento[5]
= {
tempo_segundo(9, 0, 0), // colocar
aqui as horas interessada (hora, min,
seg)
tempo_segundo(11, 00, 0),
tempo_segundo(13, 0, 0),
tempo_segundo(15, 00, 0),
tempo_segundo(20, 40, 0)
};

void setup() {
Serial.begin(9600);
dht.begin(); // inicia o DHT11
nome = String(z) + ".txt";
SD.begin(CS_PIN); // inicia o SD

pinMode(relePin, OUTPUT);

// apos primeira compilação comenta
abaixo;
myRTC.setDS1302Time(0, 45, 10, 7,
1, 04, 2017); // (segundos, minutos,
hora, dia da semana, dia do mes, mes,
ano)
// caso o arquivo já exista
while (SD.exists(nome)) {
nome = String(++z) + ".txt";
}
Serial.println(nome);
```

```

}

const int qtd_medidas = 12; // numero
de medidas

void loop() {
  unsigned long t_atual = millis(); //
  pega o tempo atual em ms

  myRTC.updateTime(); // atualiza o
tempo do RTC
  float humidade = dht.readHumidity();
//recebe UR
  float temperatura =
dht.readTemperature(); // recebe T

  int dia = myRTC.dayofmonth;
  int mes = myRTC.month;
  int ano = myRTC.year;
  int hora = myRTC.hours;
  int minutos = myRTC.minutes;
  int segundos = myRTC.seconds;

  if (t_atual - t_previo >=
tempo_medida) {
    t_previo = t_atual; // Salva o tempo
atual

    File dataFile =
SD.open("trabalho.txt",
FILE_WRITE);

    if (dataFile) {
      dataFile.print(dia);
dataFile.print("/");
      dataFile.print(mes);
dataFile.print("/");
      dataFile.print(ano);
dataFile.print(",");
      dataFile.print(hora);
dataFile.print(":");
      dataFile.print(minutos);
dataFile.print(":");

      dataFile.print(segundos);
dataFile.print(",");
      dataFile.print(humidade);
dataFile.print(",");
      dataFile.println(temperatura);
    }
    dataFile.close();

    if (n < qtd_medidas) {

      File myFile = SD.open(nome,
FILE_WRITE); //abre .txt da hora
atual e grava os mesmos dados do BD.

      if (myFile) {
        myFile.print(humidade);
        myFile.print(" ");
        myFile.println(temperatura);
      } else {
        Serial.println("Erro no arquivo de
dados horarios.");
      }
      myFile.close();
      n++;

    } else { // n >= qtd_medidas

      File myFile = SD.open(nome,
FILE_READ);

      float M[qtd_medidas][2];

      // zera a matriz de dados (não
pegar lixo anterior)
      for (int i = 0; i < qtd_medidas - 1;
i++) {
        for (int j = 0; j < 2; j++) {
          M[i][j] = 0;
        }
      }

      int i = 0, j = 0;
      String numero = "";
      while (myFile.available()) {

```

```

txt = myFile.read();

if (txt != '' && txt != '\n') {
    numero += txt;
} else {
    float valor = numero.toFloat();
    numero = "";

    M[i][j] = valor;
    ++j;
    if (j > 1) {
        i++;
        j = 0;
    }
}

myFile.close();

float somaTemp = 0;
float somaHumid = 0;
float Tmax = 0, Tmin = M[0][1];
float Umax = 0, Umin = M[0][0];

for (int i = 0; i < qtd_medidas; i++)
{
    somaTemp += M[i][1];
    somaHumid += M[i][0];
    //calcular as Tmáxima e
Umáxima aqui
    if (Tmax < M[i][1]) Tmax =
M[i][1];
    if (Tmin > M[i][1]) Tmin =
M[i][1];
    //calcular as Tmínima e Umínima
aqui
    if (Umax < M[i][0]) Umax =
M[i][0];
    if (Umin > M[i][0]) Umin =
M[i][0];
}

float Tmedia = somaTemp /
qtd_medidas;

float Umedia = somaHumid /
qtd_medidas;
dataFile.close();

for (int i = 0; i < 1; i++) {

    n = 0;
    nome = String(++z) + ".txt";
}

unsigned int tempo_atual =
tempo_segundo(myRTC.hours,
myRTC.minutes, myRTC.seconds);
//Serial.println(tempo_atual);
for (int i = 0; i < 5; i++) {
    // compara o tempo atual na faixa
de 30 segundos do tempo para ligar a
bomba
    if ( tempo_atual >=
tempo_funcionamento[i] &&
tempo_atual <=
(tempo_funcionamento[i] + 10)) {
        t_previo_bomba = t_atual;
        digitalWrite(relePin, HIGH);
        digitalWrite(releBomba, HIGH);
    } else if (t_atual - t_previo_bomba
>= tempo_bomba) {
        t_previo_bomba = t_atual;
        digitalWrite(relePin, LOW);
        digitalWrite(releBomba, LOW);
    }
}
}

```

## ANEXO F: Código fonte do programa utilizado na Fase 2 do trabalho.

```
/*
  BIBLIOTECAS
*/
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
//Trabalha com interrupções do TMR1
#include "TimerOne.h"
//Biblioteca do módulo RTC (Real
Time Clock)
#include "RTCLib.h"
//Biblioteca do Sensor DHT
#include <DHT.h>
//Biblioteca do módulo SD (Secure
Digital)
#include <SD.h>
//Biblioteca de Funções Matemáticas
#include <math.h>
/*
  PINOS E CONSTANTES
*/
//Mostra LOGS, se DEBUG 1 ou não
se DEBUG 0
#define DEBUG 1

//Tempo entre as medidas em
segundos
#define TEMPO_DHT_BDCOMP 2

#define TEMPO_RADIACAO 60

#define TEMPO_ENTRE_MEDIDAS
60

#define NUMERO_MEDIDAS 15

#define QTD_SOLENOIDE 8

#define PINO_DHT 2

#define TIPO_DHT DHT22

#define PINO_SD 10

#define PINO_BOMBA 4

#define PINO_SOLENOIDE { 22, 23,
24, 25, 26, 27, 28, 29 }

#define PINO_LED_IRR 43 //LED
para indicar irrigacao em andamento.

#define PIN_RG A0

#define NOME_ARQUIVO
"bd_comp.csv"

#define
NOME_ARQUIVO_CALCULO
"calculo.csv"

#define
NOME_ARQUIVO_LAMINA_ACU
MULADA "irnbu.txt"

#define ALTITUDE 670.0 // Altitude
em VIÇOSA

#define RS 70.0

#define CPAR 1007.0

#define EMISS 0.85

#define TRANSMIT 0.8

#define SB 0.000000056697

#define EMISSAP 0.86

#define ALBEDO 0.23

//Grupo de ajustes de horário
```

```

#define G1_T 120 //duracao em
segundos

#define G2_T 120

#define HG1_1 9 //colocar aqui o
horário em horas

#define HG1_2 12

#define HG1_3 15

#define HG2_1 9

#define HG2_2 12

#define HG2_3 15

/*
  VARIÁVEIS GLOBAIS
*/

//Objeto DHT para manipulação de
temperatura e humidade
DHT sensorDHT(PINO_DHT,
TIPO_DHT);

const byte pinoSoleinoide[8] =
PINO_SOLENOIDE;
const float KC[8] = { 0.0, 0.0, 1.55,
1.39, 0.5, 0.5, 1.0, 1.0 };
const float DMP[8] = { 1.0, 1.0, 1.0,
1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0 }; //{ 0.1, 0.1,
0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1 };
const float IA[8] = { 32.6, 32.6, 32.6,
32.6, 36.3, 36.3, 36.3, 36.3 };
const float EFICIENCIA[8] = { 0.88,
0.88, 0.88, 0.88, 0.85, 0.85, 0.85, 0.85
};
float irn[8] = { 0.0 };
float irn_bu[8] = { 0.0 };
float ETc[8] = { 0.0 };
bool teste[8] = { false };
volatile bool fila[8] = { false };

volatile int tempoIrrigacao[8] = { 0 };
float itn[8] = { 0.0 };
char txt;

RTC_DS3231 rtcRelogio;

//Tempo entre as medidas
volatile int contaTempo = 0;

//Numero de medidas realizadas
volatile byte contaMedida = 0;

//Indica se a bomba e o solenoide
devem atuar
volatile boolean atuarBombaSolenoide
= false;

//Indica se a medida deve ser salva no
cartão
volatile boolean salvarCartao = false;

//Tempo de leitura DHT
volatile byte contaDHT = 0;
volatile boolean leDHT = false;

volatile byte contaRadiacao = 0;
volatile boolean leRadiacao = false;

volatile bool chamamento = false;
volatile int processando = 0;
volatile int tempoProcessamento = 0;
volatile bool ativa = false;

//Arquivo para salvar os dados
File arquivoDados;
File arquivoDadosBackup;
File arquivoIRNBackUp;
File arquivoTemperaturas;

//Soma de temperaturas
float somaTemperatura = 0;
float somaRadiacao = 0;
byte contaRadiacaoMedia = 0;

```

```

//Soma de Humidades
float somaHumidade = 0;

//Soma Eto
float somaEto = 0;

typedef struct STRUCT_DADOS {
  uint8_t contMed;
  float somaTemp;
  float somaUmi;
} BackupDado;

int hora_anterior = 0;
/*
  ESCOPOS
*/
//Inicializa o sistema
void setup();
//Interação principal do sistema
void loop();

void trataInterrupcao();
void salvarMedidaCartao();
void salvarMedidaCartaoCalculo();
void atuandoBombaSolenoide();
void trataQuedaEnergia();
void salvaBackupDado(float, float);
float calculaETo(float, float, float);
void leituraRadiacao();

void setup() {

  //Incializando a Serial
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("Versao
V10_2_Definitiva."));

  //Inicializa do RTC
#ifdef DEBUG
  Serial.println(F("Inicializando o
Relogio..."));
#endif
  if ( !rtcRelogio.begin() ) {

#ifdef DEBUG
    Serial.println("Nao foi encontrado
um RTC, verifique as conexoes e tente
novamente.");
#endif
    while (1); //Não continua
  }

  if ( rtcRelogio.lostPower() ) {
#ifdef DEBUG
    Serial.println(F("O Relogio esta
inconsistente, definindo a hora e data
novamente!"));
#endif
    // Configura o relógio com a hora e
a data do momento da compilação.

    rtcRelogio.adjust(DateTime(F(__DAT
E__), F(__TIME__)));
  }

  // Pegando a hora Atual RTC
  DateTime horaInicial =
rtcRelogio.now();
  hora_anterior = horaInicial.hour();

#ifdef DEBUG
  Serial.println("Hora Inicial: " +
String(hora_anterior, DEC));
#endif
  // Inicializa Sensor DHT
#ifdef DEBUG
  Serial.println(F("Inicializando o
sensor DHT..."));
#endif
  sensorDHT.begin();

  // Inicializa Bomba
#ifdef DEBUG
  Serial.println(F("Inicializando a
Bomba..."));
#endif
  pinMode(PINO_BOMBA,
OUTPUT);

```

```

digitalWrite(PINO_BOMBA, HIGH
); //inicializar desliga a bomba (relé
azul)

//Inicializa Solenoides
#if DEBUG
Serial.println(F("Inicializando os
Solenoides..."));
#endif
for (byte i = 0; i <
QTD_SOLENOIDE; i++)
pinMode(pinoSoleinoide[i],
OUTPUT);

//Inicializando o Cartão SD
#if DEBUG
Serial.println(F("Inicializando o
cartao SD..."));
#endif
if (!SD.begin(PINO_SD)) {
#if DEBUG
Serial.println(F("Cartao falhou, ou
nao foi encontrado!"));
#endif
while (1); //Não continua
}

arquivoIRNBackUp =
SD.open(NOME_ARQUIVO_LAMIN
A_ACUMULADA, FILE_WRITE);

//Crie uma interrupção. Chama a
função trataInterrupcao a cada 1
segundo
Timer1.initialize( 1000000 );
Timer1.attachInterrupt(
trataInterrupcao );
}

void loop() {

if ( salvarCartao ) {
salvarMedidaCartaoCalculo();
}

if ( atuarBombaSolenoides ) {
atuandoBombaSolenoides();
}

if ( leDHT ) {
salvarMedidaCartao();
}

if ( leRadiacao ) {
leituraRadiacao();
}

}

void trataInterrupcao() {
contaRadiacao++;
contaTempo++;
contaDHT++;

if (contaDHT ==
TEMPO_DHT_BDCOMP) {
contaDHT = 0;
leDHT = true;
}

if (contaRadiacao ==
TEMPO_RADIACAO) {
contaRadiacao = 0;
leRadiacao = true;
}

if (tempoProcessamento > 0) {
#if DEBUG
Serial.println("O TEMPO: " +
String(tempoProcessamento, DEC));
#endif
tempoProcessamento -= 1;
} else if (ativa) {
ativa = false;
chamamento = true;
atuandoBombaSolenoides = true;
}
}

```

```

if (chamamento) {
  if (!atuarBombaSolenoide) {
    chamamento = false;
    //Pega a posicao do primeiro
    elemento que é 1, para iniciar o
    processamento. Atualiza o tempo com
    o tempo do elemento e aciona.
    for (int i = 0; i < 8; i++) {
      if (fila[i]) {
        processando = i;
        fila[i] = false;
        tempoProcessamento =
tempoIrrigacao[i];
        chamamento = false;
        atuarBombaSolenoide = true;
        ativa = true;
        break;
      }
    }
  }
}

if ( contaTempo ==
TEMPO_ENTRE_MEDIDAS ) {
  //Desativas a interrupção para tratar
  noInterrupts();

  //Salva a medida no cartão
  salvarCartao = true;

  //Conta a medida
  contaMedida++;

  //Volta contador para zero para uma
  nova contagem
  contaTempo = 0;

  //Ativa novamente a interrupção
  interrupts();
}

void leituraRadiacao() {
  leRadiacao = false;

  float radiacao = (((((5.0 / 1023) *
analogRead(PIN_RG)) * 1000) /
((49.4 + 0.3004) / 0.3004)) * 1000) /
14.20;
  radiacao = (2.8959 + radiacao) /
0.7422;

  if (radiacao <= 15.0) {
    radiacao = 0.0;
  }
  if (radiacao >= 0) {
    somaRadiacao += radiacao;
    contaRadiacaoMedia++;
  }
}

void salvarMedidaCartao() {
  DateTime horaAtual =
rtcRelogio.now();
  noInterrupts();
  String temperaturaDHT =
String(sensorDHT.readTemperature(),
1);
  String humidadeDHT =
String(sensorDHT.readHumidity(), 0);
  String hora =
String(horaAtual.hour(), DEC);
  String minuto =
String(horaAtual.minute(), DEC);
  String segundo =
String(horaAtual.second(), DEC);

  if ( !SD.exists( NOME_ARQUIVO )
) {

    arquivoDados =
SD.open(NOME_ARQUIVO,
FILE_WRITE);
    #if DEBUG
    Serial.println(F("CSV:
Temperatura;Humidade;Horário;"));
    #endif
    if ( arquivoDados ) {

```

```

arquivoDados.println("Temperatura;H
umidade;Horário;");
    } else {
#if DEBUG
        Serial.println(F("Verifique seu
cartão..."));
#endif
    }

    } else {
        arquivoDados =
SD.open(NOME_ARQUIVO,
FILE_WRITE);
    }

    if ( arquivoDados ) {
#if DEBUG
        Serial.println("Temperatura: " +
temperaturaDHT + " *C\tHumidade: "
+ humidadeDHT + " %\tHorário: "
+ hora + ":" + minuto + ":"
+ segundo);
        Serial.println("CSV: " +
temperaturaDHT + " *C;" +
humidadeDHT + " %;"
+ hora + ":" + minuto + ":"
+ segundo + ";"");
#endif

arquivoDados.println(temperaturaDH
T + ";" + humidadeDHT + ";"
+ hora + ":" + minuto
+ ":" + segundo + ";"");
        arquivoDados.close();
    } else {
#if DEBUG
        Serial.println(F("Verifique seu
cartão..."));
#endif
    }

leDHT = false;

        interrupts();
    }

float calculaETo(float temperatura,
float umidade, float radiacao) {
#if DEBUG
    Serial.println("TEMPERATURA E
UMIDADE: " + String(temperatura, 1)
+ " " + String(umidade, 0));
#endif

    float tout = temperatura + 3.0;
#if DEBUG
    Serial.println("TOUT: " +
String(tout, 1));
#endif

    float patm = 10.3287 * pow(1.0 - ( ( (
0.0065 * ALTITUDE ) / 288.0 ) ),
5.2568 ) * ( 101337.0 / 10.33 ); // Pa ...
(101337/10.33) converte de mca pra
Pa
#if DEBUG
    Serial.println("PATM: " +
String(patm, 2));
#endif

    float l = 2500000.0 - (2370.0 *
temperatura); // J/Kg
#if DEBUG
    Serial.println("L: " + String(l, 2));
#endif

    float es = 610.78 * pow( 10, (( 7.5 *
temperatura) / ( 237.3 + temperatura )
) ); // Pa
#if DEBUG
    Serial.println("ES: " + String(es, 2));
#endif

    float delta = ( 4098.0 * es ) / ( pow( (
237.3 + temperatura ), 2 ) ); // Pa/°C
#if DEBUG

```

```

Serial.println("DELTA: " +
String(delta, 2));
#endif

float gamma = ( CPAR * patm ) / (
0.622 * 1 ); // Pa/°C
#if DEBUG
Serial.println("Gamma: " +
String(gamma, 2));
#endif

float ea = ( umidade * es ) / 100.0; //
Pa
#if DEBUG
Serial.println("EA: " + String(ea, 2));
#endif

float dpvar = es - ea; // Pa
#if DEBUG
Serial.println("DPVAR: " +
String(dpvar, 2));
#endif

float RoVapor = (216.68 * (ea /
100.0)) / ((273.15 + temperatura)); //
g/m³
#if DEBUG
Serial.println("RoVapor: " +
String(RoVapor, 2));
#endif

float RoSeco = (348.37 * (936.269 -
(ea / 100.0))) / (273.15 + temperatura);
// g/m³
#if DEBUG
Serial.println("RoSeco: " +
String(RoSeco, 2));
#endif

float RoAr = (RoVapor + RoSeco) /
1000.0; // g/m³
#if DEBUG
Serial.println("RoAr: " +
String(RoAr, 2));
#endif

#endif

float Boc = radiacao * ( 1.0 -
ALBEDO ); // W/m²
#if DEBUG
Serial.println("Boc: " + String(Boc,
2));
#endif

float Bol = EMISS * TRANSMIT *
SB * (pow( ( 273.15 + temperatura ), 4
) - EMISSAP * pow( ( 273.15 + tout),
4) ); // W/m²
#if DEBUG
Serial.println("Bol: " + String(Bol,
2));
#endif

float Rn = Boc - Bol; // W/m²
#if DEBUG
Serial.println("Rn: " + String(Rn, 2));
#endif

float G = 0.1 * Rn; // W/m²
#if DEBUG
Serial.println("G: " + String(G, 2));
#endif

float rh = ( 280.0 * gamma ) / ( delta
+ gamma ); // s/m
#if DEBUG
Serial.println("RH: " + String(rh, 2));
#endif

float EToW = ( delta * ( Rn - G ) + (
( RoAr * CPAR * dpvar ) / rh ) ) / (
delta + gamma * ( 1.0 + ( RS / rh ) ) );
// W/m²
#if DEBUG
Serial.println("EToW: " +
String(EToW, 2));
#endif

```

```

float EToM = ( EToW * 60000.0 ) /
l; // g/m².min
#if DEBUG
  Serial.println("EToM: " +
String(EToM, 2));
#endif

float ETo = EToM * 0.06; // mm/h.
'ETo = EToM * (60.0/1000.0)'

if (ETo <= 0.0) {
  ETo = 0.0;
}

#if DEBUG
  Serial.println("ETo: " + String(ETo,
2));
#endif

return ETo;
}

void salvarMedidaCartaoCalculo() {
  DateTime horaAtual =
rtcRelogio.now();

  noInterrupts();
  float temperaturaDHT =
sensorDHT.readTemperature();
  float humidadeDHT =
sensorDHT.readHumidity();
  String hora =
String(horaAtual.hour(), DEC);
  int horaInt = horaAtual.hour();
  String minuto =
String(horaAtual.minute(), DEC);
  String segundo =
String(horaAtual.second(), DEC);
  String dia = String(horaAtual.day(),
DEC);
  String mes =
String(horaAtual.month(), DEC);
  String ano = String(horaAtual.year(),
DEC);

  somaTemperatura +=
temperaturaDHT;
  somaHumidade += humidadeDHT;

  //Iniciando processo de BACKUP
#if DEBUG
  // Serial.println(F("Realizando
backup no cartão..."));
  Serial.println("Medida número: " +
String(contaMedida) + " realizada");
#endif

  salvarCartao = false;
#if DEBUG
  Serial.println("Hora Atual:" + hora +
" Hora Anterior: " +
String(hora_ anterior, DEC));
#endif

  //Verifica se a hora virou
if ( horaInt > hora_ anterior || (horaInt
== 0 && hora_ anterior == 23)) {
#if DEBUG
  Serial.println(F("Calculando
ETo:"));
#endif
  float radiacaoMedia = 0.0;
  if (contaRadiacaoMedia != 0)
    radiacaoMedia = (somaRadiacao /
contaRadiacaoMedia);
  float temperaturaMedia =
(somaTemperatura / contaMedida);
  float umidadeMedia =
(somaHumidade / contaMedida);

  if (isnan(temperaturaMedia)) {
    Serial.print(F("T = NaN. "));
    temperaturaMedia = 20;
    Serial.println(F("Assumir UR de
20 C.));
  }
  temperaturaMedia =
((temperaturaMedia - 0.2240) /

```

```
0.9892); //Eq. de calibração da T para
DHT22
```

```
    if (isnan(umidadeMedia)) {
        Serial.println(F("UR = NaN."));
        umidadeMedia = 44;
        Serial.println(F("Assumir UR de
44%."));
    }

    float ETo =
calculaETo(temperaturaMedia,
umidadeMedia, radiacaoMedia);
#ifdef DEBUG
    Serial.print("ETo= ");
    Serial.println(ETo);
#endif

    if ( !SD.exists(
NOME_ARQUIVO_LAMINA_ACU
MULADA ) ) {
        Serial.println(F("Arquivo de back
up nao encontrado."));
    }
    arquivoIRNBackUp =
SD.open(NOME_ARQUIVO_LAMIN
A_ACUMULADA, FILE_READ);

    int i = 0;
    String numero = "";

    while
(arquivoIRNBackUp.available()) {
        txt = arquivoIRNBackUp.read();

        if (txt != ',' && txt != '\n') {
            numero += txt;
        } else {
            float valor = numero.toFloat();
            numero = "";
            irn_bu[0] = irn_bu[1];
            irn_bu[1] = irn_bu[2];
            irn_bu[2] = irn_bu[3];
            irn_bu[3] = irn_bu[4];
```

```
            irn_bu[4] = irn_bu[5];
            irn_bu[5] = irn_bu[6];
            irn_bu[6] = irn_bu[7];
            irn_bu[7] = valor;
        }
    }
    arquivoIRNBackUp.close();

    Serial.println("irn e irn_bu antes de
comparar:");
    for (int i = 0; i < 8; i++) {
        Serial.print(irn[i]); Serial.print("
"); Serial.println(irn_bu[i]);
    }

    for (int i = 0; i < 8; i++) {
        itn[i] = 0.0;
        tempoIrrigacao[i] = 0.0;
        ETc[i] = ETo * KC[i];

        if (irn[i] != irn_bu[i]) {
            irn[i] = irn_bu[i];
        }
        irn[i] += ETc[i];
        if (irn[i] >= DMP[i]) {
            itn[i] = irn[i] / EFICIENCIA[i];
            tempoIrrigacao[i] = (int) (3600 *
(itn[i] / IA[i]));
            irn[i] = 0.0;
            teste[i] = true;
        }
    }

    Serial.println("irn depois de
comparar (ja acrescida de ETc):");
    for (int i = 0; i < 8; i++) {
        Serial.println(irn[i]);
    }

    //Grupos de Irrigação com tempo
fixo, se o teste anterior dizer true, mas
não for a hora fixada teste recebe false
```

```

    if (horaInt == HG1_1 || horaInt ==
HG1_2 || horaInt == HG1_3) {
        teste[0] = true;
        tempoIrigacao[0] = G1_T;
    } else {
        teste[0] = false;
    }

    if (horaInt == HG2_1 || horaInt ==
HG2_2 || horaInt == HG2_3) {
        teste[1] = true;
        tempoIrigacao[1] = G2_T;
    } else {
        teste[1] = false;
    }

    if ( !SD.exists(
NOME_ARQUIVO_CALCULO ) ) {
        arquivoDadosBackup =
SD.open(NOME_ARQUIVO_CALC
ULO, FILE_WRITE);
#ifdef DEBUG
        Serial.println(F("CSV:
Data;Hora;Temperatura;Umidade;Rad
iacao;ETo;ETc;IRN;Teste;ITN;Ti"));
#endif
        if ( arquivoDadosBackup ) {

arquivoDadosBackup.println("Data;H
ora;Temperatura;Umidade;Radiacao;E
To;ETc;IRN;Teste;ITN;Ti(min)");
        } else {
#ifdef DEBUG
            Serial.println(F("Verifique seu
cartão..."));
#endif
        }
        } else {
            arquivoDadosBackup =
SD.open(NOME_ARQUIVO_CALC
ULO, FILE_WRITE);
        }

        if ( arquivoDadosBackup ) {

            arquivoDadosBackup.print(dia +
"/" + mes + "/" + ano + ";" + hora + ":"
+ minuto + ":" + segundo + ";" +
String(temperaturaMedia, 1) + ";" +
String(umidadeMedia, 0) + ";" +
String(radiacaoMedia, 0) + ";" +
String(ETo, 2) + ";");

            Serial.print("temperaturaMedia: ");
Serial.println(temperaturaMedia);
            Serial.print("somaTemperatura: ");
Serial.println(somaTemperatura);
            Serial.print("contaMedida: ");
Serial.println(contaMedida);

            String montaETc;
            String montaIRN;
            String montaTeste;
            String montaITN;
            String montaTempIrigacao;
            for (int i = 0; i < 8; i++) {
                Serial.println("ETc: " +
String(ETc[i], 2));

                if (i != 7) {
                    montaETc += String(ETc[i], 2)
+ ",";
                    montaIRN += String(irn[i], 2) +
",";
                    montaTeste += String(teste[i],
2) + ",";
                    montaITN += String(itn[i], 2) +
",";
                    montaTempIrigacao +=
String((tempoIrigacao[i] / 60.0), 1) +
",";
                } else {
                    montaETc += String(ETc[i], 2);
                    montaIRN += String(irn[i], 2);
                    montaTeste += String(teste[i],
2);
                    montaITN += String(itn[i], 2);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        montaTempIrigacao +=
String((tempoIrigacao[i] / 60.0), 1);
    }
}

arquivoDadosBackup.print(montaETc
+ ";" + montaIRN + ";" + montaTeste
+ ";" + montaITN + ";" +
montaTempIrigacao + ";\n");
    arquivoDadosBackup.close();
}

arquivoIRNBackUp =
SD.open(NOME_ARQUIVO_LAMINA
_AACUMULADA, FILE_WRITE);

if ( arquivoIRNBackUp ) {
    String montaIRN;
    Serial.println("salvando irn_bu no
SD (irn_bu = irn_acum. + ETc:");
    Serial.print("DMP: ");
Serial.println(DMP[0]);
Serial.println("");
    for (int i = 0; i < 8; i++) {
        if (i <= 7) {
            montaIRN += String(irn[i], 2) +
";";
            Serial.println("irn: " +
String(irn[i], 2));
        }
    }

arquivoIRNBackUp.print(montaIRN);
    arquivoIRNBackUp.close();
}

for (int i = 0; i < 8; i++) {
    //Verifica se alguem da fila deve
ser acionado, se sim chamamento
recebe 1, caso contrário 0
    if (teste[i] == true) {
        chamamento = true;
    }
}

```

```

        fila[i] = teste[i];
        teste[i] = false;
#ifdef DEBUG
        Serial.print(i); Serial.print("\t");
        Serial.print("fila: ");
Serial.print(fila[i]); Serial.print("\t");
        Serial.print("teste: ");
Serial.println(teste[i]);
#endif
    }

//Zera o contador de Temperaturas
somaRadiacao = 0;
contaRadiacaoMedia = 0;
somaTemperatura = 0;
//Zera o contador de Humidades
somaHumidade = 0;
//Zera o contador de medidas para
uma próxima interação
    contaMedida = 0;
    hora_anterior = horaInt;
} //fecha a verificacao da virada de
hora.
    interrupts();
} //fecha void
salvarMedidaCartaoCalculo().

void atuandoBombaSolenoide() {
    noInterrupts();
    if (ativa) {
#ifdef DEBUG
        Serial.println(F("Iniciando processo
de acionamento da bomba e do
solenoide."));
#endif
        pinMode(PINO_LED_IRR,
OUTPUT);
        digitalWrite(PINO_LED_IRR,
HIGH ); //liga LED_IRR

        digitalWrite(PINO_BOMBA,
LOW); // liga bomba, relé azul
    }
}

```

```

digitalWrite(pinoSoleinoide[processan
do], HIGH);
} else {
#if DEBUG
    Serial.println(F("Iniciando processo
de desligamento do solenoide."));
#endif

digitalWrite(pinoSoleinoide[processan
do], LOW);

    if (fila[0] == 0 && fila[1] == 0 &&
fila[2] == 0 && fila[3] == 0 &&
fila[4] == 0 && fila[5] == 0 &&
fila[6] == 0 && fila[7] == 0) {
        digitalWrite(PINO_LED_IRR,
LOW ); //desliga LED_IRR
        digitalWrite(PINO_BOMBA,
HIGH ); //desliga bomba, relé azul
        Serial.println(F("Iniciando
processo de desligamento da
bomba."));
    }
}
    atuarBombaSolenoide = false;
    interrupts();
}

```