

FÁBIO TEIXEIRA DELAZARI

**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO TOMATEIRO EM FUNÇÃO DA
FREQUÊNCIA DE IRRIGAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

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

T

Delazari, Fábio Teixeira, 1986-
D343r Respostas ecofisiológicas do tomateiro em função da
2018 frequência de irrigação / Fábio Teixeira Delazari. – Viçosa, MG,
2018.
ix, 49 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Derly José Henriques da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 38-49.

1. Tomate - Cultivo - Efeito da irrigação. 2. Estômatos.
3. Tomate - Raízes - Desenvolvimento. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Fitotecnia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. II. Título.

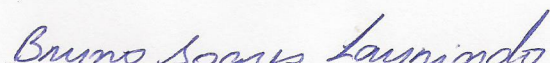
CDD 22. ed. 635.64287

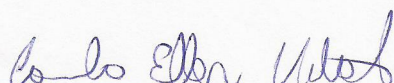
FÁBIO TEIXEIRA DELAZARI

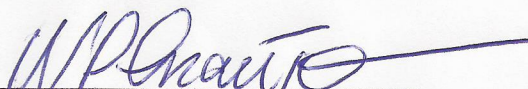
**RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO TOMATEIRO EM FUNÇÃO DA
FREQUÊNCIA DE IRRIGAÇÃO**

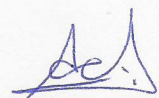
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.


APROVADA: 19 de dezembro de 2018.


Bruno Soares Laurindo


Camilo Elber Vital


Wagner Luiz Araújo
(Coorientador)


Adilson de Castro Antônio


Derly José Henriques da Silva
(Orientador)

Aos meus pais José Geraldo Delazari e Maria do Rosário Teixeira Delazari, à minha irmã Janaína Teixeira Delazari Silva, meu Irmão Fabrício Teixeira Delazari, meu sobrinho Heitor Delazari Silva e em especial a minha esposa Carla Aparecida Arruda Delazari e filha Ayla Arruda Delazari.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por fortalecer-me sempre e não me abandonar em nenhum momento.

À minha família, pelo grande esforço que fizeram para que eu chegasse até aqui.

À Carla e toda a sua família pelo constante apoio.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade de realização da Pós-Graduação em Agronomia - Fitotecnia.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG, pela concessão da bolsa e financiamento dos trabalhos.

Ao Prof. Derly José Henriques da Silva pela confiança, amizade, exemplo profissional e pessoal.

Aos Profs. Wagner L. Araújo e Everardo C. Mantovani pelo incentivo e colaboração.

Ao Camilo Vidal pelo apoio nas análises.

Ao Luan Brioschi Giovanelli, grande amigo pela parceria em vários trabalhos durante o doutorado.

Aos meus amigos do NEO (Núcleo de Estudos em Olericultura), em especial Bruno, Rafael, Ronaldo Gomes, Manuel Jorge e Jacob, pelo auxílio na realização dos trabalhos.

Aos funcionários da Horta de Pesquisa da UFV, pelo auxílio na condução dos experimentos.

BIOGRAFIA

FÁBIO TEIXEIRA DELAZARI, filho de José Geraldo Delazari e Maria do Rosário Teixeira Delazari, nasceu no dia 10 de fevereiro de 1986, na cidade de Ubá, estado de Minas Gerais, Brasil. Em março de 2007, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa, colando grau em novembro de 2012. Durante a graduação, trabalhou com manejo da irrigação em diferentes culturas agrícolas. Foi bolsista de iniciação científica no período de agosto de 2010 a julho de 2012. Participou de vários treinamentos de produtores e profissionais da área agrícola.

Em novembro de 2012, iniciou o Mestrado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, finalizando-o em julho de 2014.

Em agosto de 2014, ingressou no Programa de Pós-Graduação, ao nível de Doutorado, no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), submetendo-se à defesa de tese em dezembro de 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Cultura do tomateiro	3
2.2. Trocas gasosas no tomateiro	3
2.3. Sistema radicular.....	5
2.4. Fitohormônios e osmoprotetores	6
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Caracterização da área experimental	11
3.2. Produção das mudas, espaçamento de plantio e tratos culturais.....	13
3.3. Preparo do solo e adubação	13
3.4. Tratamentos.....	13
3.5. Sistema de irrigação.....	14
3.6. Manejo da irrigação	14
3.7. Variáveis climáticas	16
3.8. Delineamento experimental	18
3.9. Características avaliadas	19
3.9.1. Produtividade e eficiência no uso da água	19
3.9.2. Trocas gasosas	19
3.9.3. Temperatura foliar e déficit de pressão de vapor.....	19
3.9.4. Sistema radicular	21
3.9.5. Análise de fitohormônios	21
3.9.6. Discriminação dos isótopos de carbono	23
3.10. Análise estatística	23
4. RESULTADOS	25
4.1. Teor de água no solo	25
4.2. Produtividade, eficiência no uso água, tocas gasosas	25
4.4. Índice de área foliar, discriminação isotópica do carbono, temperatura foliar, sistema radicular.....	27
4.7. Fitohormônios e osmorreguladores	30
5. DISCUSSÃO	33
6. CONCLUSÕES.....	37
7. REFERÊNCIAS	38

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Unidade Experimental de Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Viçosa (UEPE UFV) com cultivo do tomateiro rasteiro para processamento industrial, Viçosa-MG, 2016/2017. 11
- Figura 2. Temperatura média e precipitação durante o experimento para o ano de 2016 (A) e 2017 (B) em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 16
- Figura 3. Radiação solar e evapotranspiração de referência (ET0) durante o experimento para o ano de 2016 (A) e 2017 (B) em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 17
- Figura 4. Umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor durante o experimento para o ano de 2016 (A) e 2017 (B) em Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 18
- Figura 5. Posição de amostragem, em relação à linha de plantio (A) e a profundidade amostrada (B), para a avaliação do sistema radicular do tomateiro (fonte: dreamstime.com). 21
- Figura 6. Teor de água na camada de 0-20, 20-40 e 60-80 cm para (A) frequência de irrigação diária, (B) a cada três dias, (C) a cada cinco dias e (D) para sete dias sem irrigação, durante o ciclo de cultivo. 25
- Figura 7. Temperatura foliar para cada tratamento, temperatura do ar e Déficit Pressão de Vapor para as 24 horas..... 29
- Figura 8. Densidade do comprimento (A) e densidade da área superfície radicular (B) em função da frequência de irrigação. 30
- Figura 9. Espermina (A), Putrescina (B) e Prolina (C) na folha em função da frequência de irrigação. ***Significativo a 0,1%; **Significativo ao nível de 1,0% pelo teste “t”. Intervalo de confiança 95% (IC 95%)..... 32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-hídricas do solo da área experimental em três camadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm)	12
Tabela 2. Características química do solo da área experimental em três camadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm), Viçosa-MG, 2016/2017.	12
Tabela 3. Somatório da ETc, Precipitação e Irrigação, aplicado durante a estação de 2016 e 2017 para a cultura do tomateiro.	15
Tabela 4. Resumo da análise de variância das características produtividade (PROD), eficiência no uso da água (EUA), fotossíntese líquida (An), condutância estomática (gs) e transpiração (Tr).	26
Tabela 5. Valores médios de produtividade (PROD), eficiência no uso da água (EUA) fotossíntese líquida (An), condutância estomática (gs) e transpiração (Tr) em quatro frequências de irrigação (Freq Irrigação).	26
Tabela 6. Resumo da análise de variância das características índice de área foliar (IAF), discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}C$), diferença temperatura do ar e foliar ($\Delta_{ar-foliar}$), densidade do comprimento radicular (DCR) e densidade da área específica radicular.	27
Tabela 7. Valores médios de índice de área foliar (IAF), discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}C$) diferença entre temperatura do ar e foliar ($\Delta_{ar-foliar}$), densidade de comprimento radicular (DCR) e da área superficial radicular (DSR) em quatro frequências de irrigação.....	28
Tabela 8. Resumo da análise de variância das características ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC), citocinina (CIT) e ácido abscísico (ABA).	30
Tabela 9. Valores médios de ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC), citocinina (CIT) e ácido abscísico (ABA) em quatro frequências de irrigação (Freq Irrigação).	31

RESUMO

DELAZARI, Fábio Teixeira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2018. **Respostas ecofisiológicas do tomateiro em função da frequência de irrigação.** Orientador: Derly José Henriques da Silva. Coorientadores: Wagner Luiz Araújo e Everardo Chartuni Mantovani.

Na produção de hortaliças há muitas informações sobre o aumento da produtividade do tomateiro para produção industrial, mas com poucas informações sobre qual a melhor frequência de irrigação possibilite as melhores interações entre as trocas gasosas, desenvolvimento radicular e produtividade. Assim, objetivo foi estudar o efeito da frequência de irrigação sobre a produtividade, eficiência fotossintética e respostas morfofisiológicas do tomateiro para processamento industrial, cultivada em campo na região de Viçosa-MG. O experimento foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Extensão do Departamento de Fitotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, de junho a setembro de 2016 e julho a outubro de 2017. Neste sentido foram testadas quatro frequências de irrigação: diária (FI₁), a cada três dias (FI₃), a cada cinco dias (FI₅) e a cada sete dias (FI₇) no delineamento blocos casualizados, com cinco repetições. Avaliou-se a produtividade (PROD), fotossíntese líquida (An), condutância estomática (gs), transpiração (Tr), índice de área foliar (IAF), diferença entre temperatura do ar e foliar ($\Delta_{\text{ar-folha}}$), discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}\text{C}$), densidade do comprimento radicular (DCR) e da área superficial da raiz (DSR), fitohormônios e ormorreguladores. A frequência de irrigação semanal (FI₇) proporcionaram melhorias nas trocas gasosas e plantas aclimatadas as condições de baixa disponibilidade de água no solo. O sistema radicular mais desenvolvido e de maior distribuição no perfil do solo foi obtido usando a frequência semanal. A maior produtividade de frutos e eficiência no uso da proporcionado pela frequência de irrigação semanal.

ABSTRACT

DELAZARI, Fábio Teixeira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2018. **Echophysiological responses of tomato as a function of irrigation frequency.** Adviser: Derly José Henriques da Silva. Co-Advisers: Wagner Luiz Araújo and Everardo Chartuni Mantovani.

There is substantial information regarding yield increase in the production of processing tomato, however, the information addressing what frequency of irrigation might provide better gas exchange, greater root development, and higher productivity in this crop are still incipient. Thus, the aim of this study was to investigate the irrigation frequency effect in the productivity, photosynthesis efficiency and in morpho-physiological responses of processing tomato, cultivated in open field in the region of Viçosa-MG. We conducted two experiments, both in the Unit of Research and Extension of the Crop Science Department, in the Federal University of Viçosa, Minas Gerais, Brazil. The first experiment was conducted from June to September 2016 and the second from July to October 2017. We tested the effects of four irrigation frequencies: with a daily frequency (FI₁), at every three days (FI₃), at every five days (FI₅), and every seven days (FI₇). The treatments were evaluated in a randomized block design with five repetitions. We evaluated productivity (PROD), net photosynthesis (An), stomata conductance (gs), transpiration (Tr), leaf area index (LAI), difference between air temperature and leaf temperature ($\Delta_{\text{air-leaf}}$), carbon isotopic discrimination ($\Delta^{13}\text{C}$), root length density (RLD), and density of the root surface area (DRS), phytohormones and osmoregulators. The weekly frequency of irrigation (FI₇) improved the gas exchange and promoted the acclimatization of plants under low availability of water in the soil. The more developed root system and with higher distribution in the soil was obtained with the weekly frequency of irrigation. The weekly frequency of irrigation provided the higher productivity of fruits and higher efficiency of water use.

1. INTRODUÇÃO

O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é uma das principais hortaliças produzidas no mundo, estando presente diariamente na alimentação de grande parte da população. Em 2016, a produção de tomate no Brasil foi de 4.3 milhões de toneladas, em uma área de 65,2 mil hectares, o que coloca o país entre os maiores produtores mundiais (FAOSTAT, 2017).

A cadeia produtiva brasileira de tomate industrial está entre as mais importantes do agronegócio nacional. Nos últimos 30 anos, notáveis investimentos foram realizados no setor, gerando grande incremento na produção com a melhoria nas técnicas de cultivo (BRITO; CASTRO, 2010).

As técnicas de cultivo que permitem que as plantas maximizem funções biológicas como a absorção e utilização de CO₂, água e nutrientes, atualmente, vem ganhando importância. Um mecanismo fisiológico realizado nas plantas que favorece esses processos é a abertura estomática. Dessa forma, é razoável supor que ao se desenvolver um sistema de produção de tomate que promova maior tempo de abertura estomática no dossel da planta durante o período de luz, será possível alcançar maiores produtividades (ALMEIDA et al., 2017).

O tomateiro é uma cultura muito exigente em água e responde negativamente tanto ao excesso quanto ao déficit hídrico, o que afeta, em grande medida a produção (SANTANA; VIEIRA; BARRETO, 2009).

A oferta da água para as plantas nas regiões tropicais é bastante comprometida, principalmente nas primeiras camadas do solo, tornando-se importante desenvolver um sistema de produção que garanta melhorias na absorção e metabolismo das plantas. A absorção e metabolismo das plantas tem sido o foco das mais variadas pesquisas no mundo inteiro, com destaque para o uso eficiente da água, nutrientes e CO₂ (KHAPTE et al., 2019; LAKE et al., 2017; WEI et al., 2018). Absorção e utilização eficiente de CO₂, água e nutrientes pelas plantas passa pela manutenção dos estômatos abertos. Esta condição pode ser alcançada mediante o uso de técnicas de cultivo que garantam que níveis adequados de água, CO₂ e luz estejam sendo absorvidos e utilizados eficientemente pela planta (ALMEIDA et al., 2017).

Nas últimas décadas, vários estudos têm sido realizados para a compreensão da troca de gases em várias culturas e assimilação de carbono sob diferentes estratégias de irrigação, uma vez que os mecanismos que regulam a assimilação e a partição de carbono desempenham papel importante no equilíbrio entre rendimento e qualidade

(GUANGCHENG et al., 2016). A maioria desses estudos se concentrou na análise das mudanças no intercâmbio de gases foliares com diferentes níveis de disponibilidade hídrica (ACEVEDO-OPAZO; ORTEGA-FARIAS; FUENTES, 2010; GUANGCHENG et al., 2016).

Estudos mais aprofundados acerca do efeito da disponibilidade hídrica para a cultura poderão auxiliar na maior compreensão das trocas gasosas, uma vez que o déficit de água promove maior alocação relativa de fotoassimilados para o crescimento radicular, resultando em plantas com raízes maiores, garantindo maior capacidade de absorção de água e minerais para outros tecidos (JIN et al., 2015; KOZLOWSKI; PALLARDY, 2002). Ademais, a aquisição de água e nutrientes minerais são determinadas principalmente pela dimensão da zona radicular e pela distribuição da densidade radicular e da proliferação radicular (IIJIMA et al., 1991; JIN et al., 2015; KAHLON; KHURANA, 2017).

Regiões aonde a duração das chuvas é reduzida e ocorrem vários veranicos, a frequência de irrigação pode desempenhar papel importante na regulação da perda e da absorção de água. A manutenção do status hídrico vegetal sob oferta flutuante de água pode melhorar a eficiência do uso da água mediante a aclimação (CORNIC; MASSACCI, 1996; SEBASTIAN et al., 2016b). Menor frequência de aplicação de água proporciona melhor status hídrico da planta resultando em aumento de rendimento das culturas, concluindo que a menor frequência de irrigação resulta em melhor distribuição de água no perfil do solo e maior desenvolvimento radicular (SEBASTIAN et al., 2015, 2016b).

A absorção da água pelas plantas depende da água disponível no solo, arquitetura do sistema radicular, época do ano e ainda da característica genética da cultivar, das condições meteorológicas e de práticas de manejo da cultura (GRZESIAK et al., 2013). A variação na disponibilidade hídrica no solo gera rede complexa de mudanças morfológicas e fisiológicas (MORALES et al., 2015). O déficit de água promove maior alocação relativa de fotoassimilados para o crescimento radicular, resultando em plantas com raízes maiores garantindo maior capacidade de absorção de água e minerais para outros tecidos (JIN et al., 2015). A dimensão da zona radicular e a distribuição da densidade radicular como os fatores determinantes para absorção de água e nutrientes minerais, pelas plantas (KAHLON; KHURANA, 2017).

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes intervalos de irrigação sobre a produtividade, eficiência fotossintética e respostas morfofisiológicas do tomateiro para processamento industrial, cultivada em campo na região de Viçosa-MG.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do tomateiro

O tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.), uma das hortaliças mais produzidas no Brasil e no mundo, é uma planta eudicotiledônea da ordem Tubiflora e, pertencente à família *Solanaceae*. Devido à sua adaptação às condições climáticas do Brasil, é cultivado em todos os estados. Podem desenvolver-se em uma gama de latitudes, tipos de solo, temperatura e métodos de cultivo, destacando-se que os ambientes quentes, com boa iluminação e drenagem são os mais adequados para o seu cultivo (ALVARENGA, 2013).

O Brasil ocupa a oitava posição do ranking mundial na produção de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (FAOSTAT, 2017), destacando-se como uma cultura de grande importância social e econômica no Brasil. Em 2015 a área cultivada no Brasil foi de 62.782 hectares, com uma produção anual de 4.187.646 toneladas, cuja produtividade média foi de 66.802 t ha⁻¹. A região Sudeste apresenta a maior produção de tomate, sendo responsável por mais de 44% do total produzido. Registra-se que o estado de São Paulo participou com aproximadamente 45% da produção da região, e o estado do Minas Gerais contribuiu com uma produção de 144.844 toneladas, com uma área de 2.508 ha, cuja produtividade foi de 57.864 t ha⁻¹ (AGRIANUAL, 2016; IBGE, 2016).

A qualidade do tomate está relacionada com o estágio de maturação do fruto que é o que define o momento da colheita. Durante a maturação do tomate, produzem-se mudanças fisiológicas e bioquímicas que induzem a mudanças de cor, sabor, textura e aroma, definindo o momento da colheita. O estágio verde maduro (início de mudança de cor) é considerado o primeiro indicador visual para o índice de maturação. De um modo geral, a cor é o atributo de qualidade mais atrativo para o consumidor (CHITARRA; CHITARRA, 2005).

2.2. Trocas gasosas no tomateiro

A otimização da taxa de difusão de CO₂ na folha para a fotossíntese e consequente redução da taxa de perda de água através da transpiração é feita pelos estômatos (LEAKEY et al., 2009). No entanto, tanto a elevada concentração de CO₂ atmosférico como a falta de água no solo reduzem a condutância estomática (*g_s*) do vapor de água (WEI et al., 2016). Porém, os mecanismos pelos quais o fechamento estomático é induzido podem ser diferentes. Sob condições de altas concentrações de CO₂, as plantas apresentam diferentes

estratégias para o controle da g_s através de uma coordenação de fisiológica a curto prazo (via mudança de abertura) e morfológica a longo prazo (via mudança de densidade estomática), a fim de otimizar eficiência do uso da água (HAWORTH; ELLIOTT-KINGSTON; MCELWAIN, 2013).

De igual modo, a diminuição da água no solo induz a redução na g_s , devido principalmente à diminuição da turgescência foliar e pelo fechamento parcial dos estômatos induzido sinalização química enviado pela raiz à parte aérea (LIU et al., 2006). Embora a densidade estomática também pudesse ser modificada em resposta do déficit hídrico do solo prolongado (SUN et al., 2014; YANG et al., 2012). Acredita-se que déficit hídrico do solo influencia mais sobre o condutância estomática do que a concentração de CO_2 (LEAKEY et al., 2009).

Sob déficit hídrico no solo, o suprimento de água às raízes é limitado, e a planta não consegue atender a demanda transpirativa das folhas, levando a redução do turgor das folhas, aumento da temperatura foliar e fechamento estomático (ANJUM et al., 2011). Como consequência, ocorre limitação das trocas gasosas, levando à ruptura do metabolismo e da estrutura celular, podendo resultar na paralisação da fotossíntese e, conseqüente morte da planta (SEBASTIAN et al., 2016a). No entanto, a suscetibilidade das plantas ao déficit hídrico depende do grau da deficiência, espécies de plantas e estágios de desenvolvimento (PATANÈ et al., 2016). A aclimação de plantas ao déficit hídrico é o resultado de diferentes eventos que levam a mudanças aclimatativas no crescimento das plantas e processos físico-bioquímicos, como mudanças na estrutura da planta, taxa de crescimento, potencial osmótico tecidual e defesas antioxidantes (ZHOU et al., 2017).

A compreensão sobre as alterações nas trocas gasosas e respostas das culturas ao déficit hídrico, permite definir ações que visem a melhoria da capacidade de resistência à esta condição e garantir maiores rendimentos. ANJUM et al., (2011) a regulação eficiente da abertura estomática através do controle da sensibilidade das células guardas em relação aos sinais ambientais, tais como luz, temperatura, umidade, CO_2 e quantidade de água na planta é essencial para garantir ganhos na produtividade.

O tomate é uma das culturas de maior exigência de água (PATANÈ et al., 2016). BANJAW; MEGERSA (2017) apontam que a qualidade da água e as práticas de manejo da irrigação, são consideradas como componentes dos principais fatores limitantes da produção de tomate. No entanto, os mesmos autores salientam que o déficit de irrigação é uma estratégia de otimização que permite, até certo ponto, o estresse hídrico durante um certo período de cultivo sem uma redução significativa no rendimento. A importância da cultura

do tomateiro mostra a necessidade constante da compreensão dos efeitos das trocas gasosas sobre a planta. Ao se conhecer como estes fatores ambientais afetam a fisiologia da planta, pode-se traçar práticas de manejo para otimizá-los, bem como aumentar a produtividade (RAO; SHIVASHANKARA; LAXMAN, 2016).

2.3. Sistema Radicular

Uma das questões importantes na agricultura, tendo em conta as mudanças climáticas globais, é a necessidade de melhorar a eficiência do uso de água e nutrientes pelas plantas (BUI; SERRA; PAGÈS, 2016). O emprego de técnicas que favoreçam o maior desenvolvimento do sistema radicular e seu aprofundamento ao longo do perfil de solo tem importância central para melhorar a absorção de água e nutrientes pelas plantas (LI et al., 2010; MAN et al., 2016)

.A disponibilidade de água no solo afeta fortemente a distribuição das raízes. A falta de água ou alagamento reduz a densidade das raízes, restringindo seu crescimento (HUI et al., 2017). Por outro lado, quando moderada, a deficiência hídrica pode aumentar a densidade da raízes, particularmente nas camadas mais profundas do solo (JIN et al., 2015; LI et al., 2010).

Segundo JIN et al.(2014b) & KOZLOWSKI; PALLARDY(2002), O déficit de água no solo promove maior alocação de foto assimilados para o crescimento radicular, resultando em plantas com raízes maiores e com maior capacidade de absorção de água e minerais. Assim, em regiões tropicais, onde a frequência das chuvas é reduzida e ocorrem vários veranicos, o manejo adequado da água no solo tem papel importante no controle da absorção e perda de água. A manutenção do estado hídrico das plantas sob oferta flutuante de água pode melhorar a eficiência do uso da água mediante a aclimatação. Isso pode melhorar a distribuição de água no perfil do solo(SEBASTIAN et al., 2016a).

Sob condições de reduzida disponibilidade de água na camada superficial do solo, a planta gera uma serie de respostas, induzindo o desenvolvimento das raízes em busca de camadas do solo onde não ocorra limitação hídrica (JIA et al., 2018a; LI et al., 2010; SHARMA et al., 2014).Por outro lado, MOHAMMADSHIRAZI et al.(2017), apontam a aplicação de calcário e gesso no solo como responsáveis pelo carreamento de nutrientes como cálcio e magnésio para camadas mais profundas, permitindo um maior desenvolvimento das raízes.

JIA et al., (2018) apontam uma série de mecanismos desenvolvidos pelas plantas para lidar com a baixa disponibilidade de água, dentre eles, a planta tolera o estresse, através de um sistema radicular bem desenvolvido, possibilitando aumentar a sua capacidade de absorver água e conservá-la, muitas vezes aliado a uma redução na área foliar e transpiração limitada. Portanto, considerando regiões tropicais e o contexto das mudanças climáticas, torna-se importante o desenvolvimento de sistema de produção que possibilita um sistema radicular profundo permitindo maior absorção de água, atendendo a demanda transpirativa das folhas, o que pode contribuir para melhorias na disponibilidade de água para as plantas.

2.4. Fitohormônios e Osmoprotetores

A restrição hídrica é responsável por sérias disfunções morfológicas, fisiológicas e bioquímicas nos vegetais causando diversas mudanças no seu metabolismo celular (MUNNS, 2011).

Dentre as alterações fisiológicas na planta e como uma defesa às condições de estresse, destacam-se: diminuição da taxa fotossintética, fechamento estomático para redução da perda de água por evaporação e diminuição da absorção de CO₂ a nível celular (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Em níveis morfológicos, o estresse hídrico provoca redução da área foliar, número de folhas, altura da planta e massa seca de folhas e caules das plantas (CORREIA; NOGUEIRA, 2004). A redução de água no solo e a diminuição da umidade do ar estão diretamente ligados ao estresse hídrico, pois afetam a transpiração causando a perda de água pela abertura estomática, como defesa a planta fecha os estômatos, reduzindo a taxa de assimilação de CO₂, isso reduz o crescimento da planta como forma de economizar água e energia (MAFAKHERI et al., 2010; SONGSRI et al., 2013).

O acúmulo de osmólitos compatíveis é uma estratégia de defesa para evitar ao máximo a perda de água na planta. Dentre os osmólitos, podemos citar prolina, glicina, betaina, trealose, sacarose, poliaminas, manitol, pinitol no vacúolo ou citosol das células vegetais (ASHRAF et al., 2011; MARIJUAN; BOSCH, 2013).

O aumento líquido na concentração das moléculas compatíveis não é nocivo ao metabolismo celular e auxilia na manutenção de sua turgescência tendo em vista que a elevação da pressão osmótica no interior das células mantém o fluxo de água na planta, permitindo continuidade dos processos fisiológicos nos vegetais (ainda que em níveis

menores) em condições de baixo potencial hídrico do solo (PINTÓ-MARIJUAN; MUNNÉ-BOSCH, 2013).

A vantagem desse mecanismo de ajuste é que o aumento dos solutos osmoticamente ativos às células é mais eficaz em promover a diminuição do potencial hídrico do que a própria perda de água fazendo com que as plantas percebam e respondam rapidamente a alterações hídricas (CHAVES; FLEXAS; PINHEIRO, 2009).

Os solutos orgânicos compartilham de propriedades semelhantes como a de permanecerem estáveis em pH neutro, serem altamente solúveis em água, mesmo em altas concentrações, e exercerem pouco ou nenhum efeito sobre a interação de macromoléculas solventes. Os carboidratos, por exemplo, podem ser armazenados tanto na forma de polissacarídeos com baixa atividade osmótica (como o amido), quanto na forma de açúcares altamente solúveis e higroscópicos (como a sacarose e hexoses) (WHITTAKER et al., 2007).

Esses solutos orgânicos também atuam como osmoprotetores preservando a integridade de proteínas, enzimas e membranas celulares contra subprodutos tóxicos do metabolismo resultantes do estresse hídrico (ASHRAF et al., 2011; PINTÓ-MARIJUAN; MUNNÉ-BOSCH, 2013).

Sob estresse biótico e abiótico as plantas sofrem alterações fisiológicas e bioquímicas, o que favorece a produção de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs). Estas espécies são altamente reativas e tóxicas causando danos a proteínas, lipídios, carboidratos, DNA e conseqüentemente levam a morte celular (MARRACCINI et al., 2012).

As EROs compreendem tanto a forma de radicais livres (O_2^- radical superóxido e OH radical hidroxila) quanto formas não radicais (H_2O_2 peróxido de hidrogênio e O_2 oxigênio singlete). Em cloroplastos, os fotossistemas I e II são os principais locais de produção das EROs, mas também são sintetizadas em outros locais a exemplo das mitocôndrias, em seu complexo I, na ubiquinona e no complexo III da cadeia transportadora de elétrons (BARBOSA et al., 2014).

Em condições ambientais normais, a produção das EROs está diretamente ligada a interação planta-estresse e desempenha um papel importante na sinalização e regulação da transdução de sinal quando a planta está sob estresse biótico ou abiótico, ou seja, as EROs em baixas quantidades, fazem parte da primeira linha de defesa contra estresses ambientais como sinalizadoras do estresse, porém, quando essa quantidade se eleva, as EROs tornam-se prejudiciais ao metabolismo celular vegetal (NANDA et al., 2010).

Os osmoprotetores incluem aminoácidos (por exemplo, prolina e aspartato), açúcares (por exemplo, sacarose, glicose, manitol e trealose), polióis, compostos de amônio

quaternário (glicina-betaina e alanina-betaina), ácidos orgânicos, entre outros (CORTINA; CULIÁÑEZ-MACIÀ, 2005). Por exemplo, a trealose, um dissacarídeo não redutor que funciona como um soluto compatível protegendo estruturas biológicas sob estresse, tem sido usada para aumentar a tolerância à seca em arroz e tomate (CORTINA; CULIÁÑEZ-MACIÀ, 2005).

A trealose é um composto resistente a hidrólise ácida e estável em solução mesmo em altas temperaturas. Quando desidratada tem a habilidade de ficar no estado "glass-like". Associando-se isto ao fato dela substituir as pontes de hidrogênio feitas com a água pelas biomoléculas, foi proposto que ela atua na proteção de membranas e biomoléculas em condições de estresse, além de desempenhar importante papel na desintoxicação dos EROs (FERNANDEZ et al., 2010).

O acúmulo de aminoácidos, mais especificamente da prolina está relacionada a uma das respostas mais comuns ao estresse hídrico em plantas, pois desempenha um papel de osmoprotetor contribuindo para a estabilização das membranas e estruturas subcelulares além de atuar, juntamente com flavonóides e carotenóides, como antioxidante não enzimático que protege as funções celulares da intoxicação por espécies reativas de oxigênio (KAUR; ASTHIR, 2015; SHARMA et al., 2012).

Assim, o aumento do nível de aminoácidos livres reduz os efeitos do déficit hídrico por aumentar a capacidade de retenção de água (MORANDO et al., 2014). Em parte, isso ocorre devido a algumas propriedades intrínsecas dessas moléculas que contêm ambas as porções amino (-NH₂) e um grupo funcional carboxil (-COOH); a prolina contém uma porção imino (C=NH), ou seja, um grupo funcional carboxil e um grupo imino secundário que confere as características de neutralidade à molécula e é reportada como um importante osmoprotetor atuante na integridade e proteção da membrana plasmática (MORANDO et al., 2014).

A prolina é o soluto compatível mais estudado devido à sua elevada sensibilidade de resposta a condições de estresse (ASHRAF et al., 2011). Assim, a medição de seu conteúdo fornece um importante parâmetro para a seleção de plantas tolerantes, sendo constatado que o aumento em suas concentrações atenua os efeitos do estresse hídrico (CVIKROVÁ et al., 2013).

A prolina pode funcionar como uma chaperona que é um tipo de molécula capaz de interagir com determinadas proteínas (protegendo a sua integridade) e com enzimas (aumentando a sua atividade). Ao mesmo tempo, pode agir como uma molécula de sinalização para modular as funções mitocondriais, proliferação e/ou morte celular; nesse

sentido, funciona como iniciador na expressão de genes específicos que podem ser essenciais para a recuperação da planta após o estresse (SZABADOS; SAVOURÉ, 2010).

A concentração deste aminoácido pode aumentar até 100 vezes em comparação ao que é observado em condições normais, sem estresse hídrico (VERBRUGGEN; HERMANS, 2008).

As plantas modulam o seu crescimento e metabolismo para responder a adversidades ambientais. Um dos estresses ambientais mais impactantes enfrentados pelas plantas é a seca, que leva à redução da disponibilidade de água no solo e à redução do potencial hídrico das plantas. As plantas respondem à limitação da água através uma série de mecanismos que contribuem para evitar e tolerar o baixo potencial hídrico do solo. Mecanismos como o fechamento dos estômatos e aumento na relação raiz-parte aérea através da sinalização pelo Acido abscísico, objetivam conservar a umidade do solo ou encontrar água adicional mantendo o status hídrico da planta e, assim, evitar novas quedas no potencial hídrico e na desidratação do tecido vegetal (VERSLUES, 2016).

A manutenção do status hídrico da planta pelo rápido fechamento estomático promove alterações no crescimento e desenvolvimento, envolvendo a comunicação a longa distância entre diferentes órgãos, mediada, principalmente pelo ácido abscísico (ABA) entre outros hormônios do estresse (CHATER et al., 2015; KUROMORI; SEO; SHINOZAKI, 2018; SUBRAMANIAM et al., 2016). Outros hormônios produzidos em plantas nesta condição, incluem auxina ou ácido indol-3-acético (IAA, a principal forma de auxina na maioria das plantas), brassinosteróides, citocininas, etileno, giberelinas, ácido jasmônico (JA), nítrico óxido, ácido salicílico (SA) (LIU et al., 2012).

De acordo POSPÍŠILOVÁ et al. (2005), o ácido abscísico (ABA) tem sido relacionado como um componente chave nas respostas induzidas pelo déficit hídrico, incluindo aquelas desencadeadas pela seca, salinidade e baixa temperatura. Embora plantas bem irrigadas contenham ABA, o estresse hídrico estimula a biossíntese de ABA em raízes e folhas. Reduções da condutância estomática da planta em resposta a redução da disponibilidade hídrica no solo são devidas principalmente ao fechamento parcial estomático induzido pela sinalização química da raiz à parte aérea, principalmente ácido abscísico (ABA) e pela diminuição do turgor nas folhas (YAN; LI; LIU, 2017). O ácido abscísico (ABA) é um regulador central de respostas ao redução do potencial de água e desidratação do tecido vegetal que ocorre durante os períodos de seca. A importância da ABA foi estabelecida por numerosas observações do acúmulo de ABA em água plantas estressadas,

assim como respostas de estresse prejudicadas em mutantes deficientes em ABA (CUTLER et al., 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

Os experimentos foram conduzidos na Unidade Experimental de Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Viçosa (UEPE UFV), Viçosa, Minas Gerais, Brasil, com latitude de 20° 45' 29" S, longitude de 42° 50' 46" O e altitude de 686 m, em dois experimentos. O experimento I correspondeu ao cultivo no período de junho a setembro de 2016. O experimento II, correspondente ao cultivo no período de julho a outubro de 2017 (Figura 1).



Figura 1. Unidade Experimental de Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Viçosa (UEPE UFV) com cultivo do tomateiro rasteiro para processamento industrial, Viçosa-MG, 2016/2017.

O solo da área experimental apresenta classificação do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico de topografia plana (EMBRAPA, 2013). A análise física indicou textura argila (0-20 cm), muito argilosa (20-40 cm) e argila (40-60 cm) (LEMOS; SANTOS, 1996). Nas Tabelas 1 e 2 são demonstradas algumas características físico-hídricas e químicas do solo em questão. Os dois experimentos foram desenvolvidos na mesma área experimental.

Tabela 1. Características físico-hídricas do solo da área experimental em três camadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm)

Prof. (cm)	0-20	20-40	40-60
θ_{CC} (m ³ m ⁻³) ¹	0,40	0,44	0,50
θ_{PMP} (m ³ m ⁻³) ²	0,27	0,30	0,35
Ds (g cm ⁻³) ³	1,21	1,28	1,40
Argila (kg kg ⁻¹)	0,517	0,549	0,626
Silte (kg kg ⁻¹)	0,159	0,120	0,116
Areia (kg kg ⁻¹)	0,324	0,331	0,258

¹Umidade na capacidade de campo pelo método padrão da bacia (tensão de -0,33 kPa); ²Umidade no ponto de murcha permanente (tensão de -15,0 kPa); ³Densidade do solo (método do anel volumétrico).

Tabela 2. Características química do solo da área experimental em três camadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm), Viçosa-MG, 2016/2017.

Ano	2016			2017		
	0-20	20-40	40-60	0-20	20-40	40-60
Prof. (cm)						
pH H ₂ O	5,72	5,48	5,18	5,80	5,50	5,50
P (mg dm ⁻³)	79,60	21,10	35,60	113,30	10,70	27,10
K (mg dm ⁻³)	209,0	136,0	104,0	145,00	66,00	82,00
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,14	3,60	3,12	3,60	2,20	2,60
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,77	0,62	0,54	0,90	0,60	0,60
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	4,50	4,70	3,70	4,79	3,30	3,47
T (cmol _c dm ⁻³)	9,95	9,27	7,63	9,70	6,30	6,90
V (%)	54,8	49,3	51,5	50,00	47,00	50,00
m (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MO (dag kg ⁻¹)	3,45	2,56	1,92	3,47	1,97	1,97
P-rem (mg L ⁻¹)	35,20	26,60	22,70	29,80	15,40	19,20
Zn (mg dm ⁻³)	7,93	5,36	4,11	8,10	1,30	2,60
Fe (mg dm ⁻³)	68,10	78,90	88,60	64,10	42,60	55,80
Mn (mg dm ⁻³)	46,60	49,60	37,60	36,80	11,80	17,40
Cu (mg dm ⁻³)	6,08	4,66	4,85	7,30	3,20	4,00
B (mg dm ⁻³)	0,39	1,22	1,29	0,50	0,40	0,40

P, K, Fe, Zn, Mn e Cu disponíveis extraídos com Mehlich I; Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; Acidez potencial a pH 7,0 extraída com acetato de cálcio 1 mol L⁻¹; B extraído com água quente.

3.2. Produção das mudas, espaçamento de plantio e tratos culturais

As mudas de tomate foram produzidas em bandejas de polietileno com 128 células preenchidas com substrato comercial de fibra de coco Golden Mix (Amafibra) e transplantadas para o solo quando tinham três a quatro folhas definitivas. Foi utilizado o híbrido de tomate para produção industrial 'Inovatr' (Nunhems - Bayer CropScience). A densidade de plantas foi de 0,45 planta/m² (0,30 x 1,50 m). Os tratos culturais foram feitos semanalmente e pragas e doenças controladas com inseticidas e fungicidas, respectivamente.

3.3. Preparo do solo e adubação

No preparo do solo foi utilizado subsolagem com hastes de 60 cm, para retirar camadas de impedimento do crescimento radicular. Foi aplicado calcário para elevar a saturação de bases para 80%. Aplicou-se gesso agrícola juntamente com o calcário para melhorar a distribuição de nutrientes (Ca²⁺ e Mg²⁺) no perfil até a profundidade de 80 cm. A adubação foi calculada de acordo com a Recomendação de Uso de Fertilizantes para o Estado de Minas Gerais (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). A adubação de plantio não foi realizada e a aplicação do calcário e gesso foram feitas duas semanas antes do transplante das mudas com o equivalente a 3,20 e 3,45 t ha⁻¹ do calcário dolomítico (PRNT = 76%) para experimento I e II, respectivamente, e 1,10 e 1,98 t ha⁻¹ de gesso agrícola para experimento 1 e 2, respectivamente, ambos incorporados a 20 cm de profundidade. Os fertilizantes utilizados foram o fosfato monoamônico (820 e 1311 kg ha⁻¹), cloreto de potássio (721 e 450 kg ha⁻¹), nitrato de cálcio (762 e 156 kg ha⁻¹), sulfato de magnésio (169 kg ha⁻¹) e ácido bórico (24 kg ha⁻¹).

3.4. Tratamentos

Foram avaliados o efeito da frequência de irrigação, na produção, na qualidade do fruto, no desenvolvimento radicular e parte aérea e na eficiência no uso da água. Os tratamentos estão descritos a seguir:

✓ Frequência de irrigação 1 (FI₁) – Reposição da lâmina de água evapotranspirada todos os dias;

✓ Frequência de irrigação 2 (FI₃) – Reposição da lâmina de água evapotranspirada a cada três dias;

✓ Frequência de irrigação 3 (FI₅) – Reposição da lâmina de água evapotranspirada a cada cinco dias;

✓ Frequência de irrigação 4 (FI₇) – Reposição da lâmina de água evapotranspirada a cada sete dias;

3.5. Sistema de irrigação

Foi utilizado sistema de irrigação por gotejamento com tubo gotejador autocompensante (10-30 mca) de vazão de 2,10 e 2,21 L h⁻¹ experimento I e II, respectivamente. Para a avaliação da eficiência de irrigação (E_i) do sistema de irrigação, foram realizadas amostragens, que consiste na estimativa das vazões de quatro emissores ao longo da linha gotejadora (início, 1/3, 2/3 e final) em quatro linhas (início, 1/3, 2/3 e final) (KELLER; KARMELI, 1975). Após as coletas foi possível calcular o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 95,6 e 98,4% para 2016 e 2017, respectivamente.

3.6. Manejo da irrigação

O manejo da irrigação baseados na evapotranspiração da cultura (ET_c). A frequência de molhamento variou de um a sete dias e a demanda hídrica foi calculada pela estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c), determinada com os coeficientes de ajuste em relação à evapotranspiração de referência (ET₀). A lâmina líquida de irrigação foi calculada pelo balanço hídrico, considerando a entrada de água por irrigação e sua saída. As equações 1 e 2 foram utilizadas para estimar a evapotranspiração da cultura (ALLEN et al., 1998; ALLEN; PEREIRA, 2009; DELAZARI et al., 2016).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

$$K_c = (K_{cb} \times K_s) + K_e \quad (2)$$

em que:

ET_c – evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹);

ET₀ – evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

- K_c – coeficiente da cultura;
- K_{cb} – coeficiente basal da cultura;
- K_e – coeficiente da evaporação do solo; e
- K_s – coeficiente de estresse.

O ciclo do tomate foi dividido em fases fenológicas, baseadas nos períodos de crescimento e desenvolvimento da cultura, relacionados com o sombreamento da área onde cada fase assumiu um valor diferente do coeficiente de cultura (K_c). Isto é necessário, pois características do estágio de desenvolvimento da cultura e condições edafoclimáticas gerais afetam os valores do K_c do tomate (ALLEN et al., 1998; DELAZARI et al., 2016).

A ET_c foi determinada com os valores de K_{cb} inicial, intermediário e final, 0,15; 1,15 e 0,70, respectivamente (ALLEN et al., 2006; DELAZARI et al., 2016).

A primeira fase fenológica correspondeu ao período iniciado logo após o transplante das mudas de tomate até próximo de 10% de área sombreada. A segunda fase fenológica finalizou quando cerca de 75% da área estava coberta pela cultura. A terceira fase fenológica, com 75% da área sombreada (ALLEN et al., 1998; HANSON; MAY, 2006) começou no início do enchimento dos frutos. A última fase fenológica iniciou com senescência e maturação dos frutos e foi até a maturação total dos frutos.

A frequência de irrigação e a quantidade total de água (irrigação + precipitação) para cada experimento são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Somatório da ET_c , Precipitação e Irrigação, aplicado durante a estação de 2016 e 2017 para a cultura do tomateiro.

Ano	Frequência Irrigação	ET_c	Precipitação	Irrigação	Precipitação e Irrigação
2016	FI ₁	282,2	83,0	236,5 (102) ^a	319,8
	FI ₃	280,0	83,0	227,5 (36)	310,8
	FI ₅	278,3	83,0	225,5 (22)	308,8
	FI ₇	276,6	83,0	212,0 (16)	295,3
2017	FI ₁	298,8	61,0	300,7 (84)	361,7
	FI ₃	296,1	61,0	283,8 (33)	344,8
	FI ₅	293,1	61,0	279,8 (24)	340,8
	FI ₇	289,9	61,0	284,3 (19)	345,3

^a Os valores entre parênteses são o número de eventos de irrigação.

3.7. Variáveis climáticas

A temperatura média no período experimental foi de 18,3 e 19,8 °C e a precipitação pluvial de 83,0 e 61,0 mm, respectivamente (Figura 2A e 2B). A temperatura ao longo do cultivo se manteve na faixa recomendada (12 e 30 °C) para o tomateiro (OHNISHI; MIYOSHI; SHIRAI, 2010; TARCHOUN; M'HAMDI; SILVA, 2012).

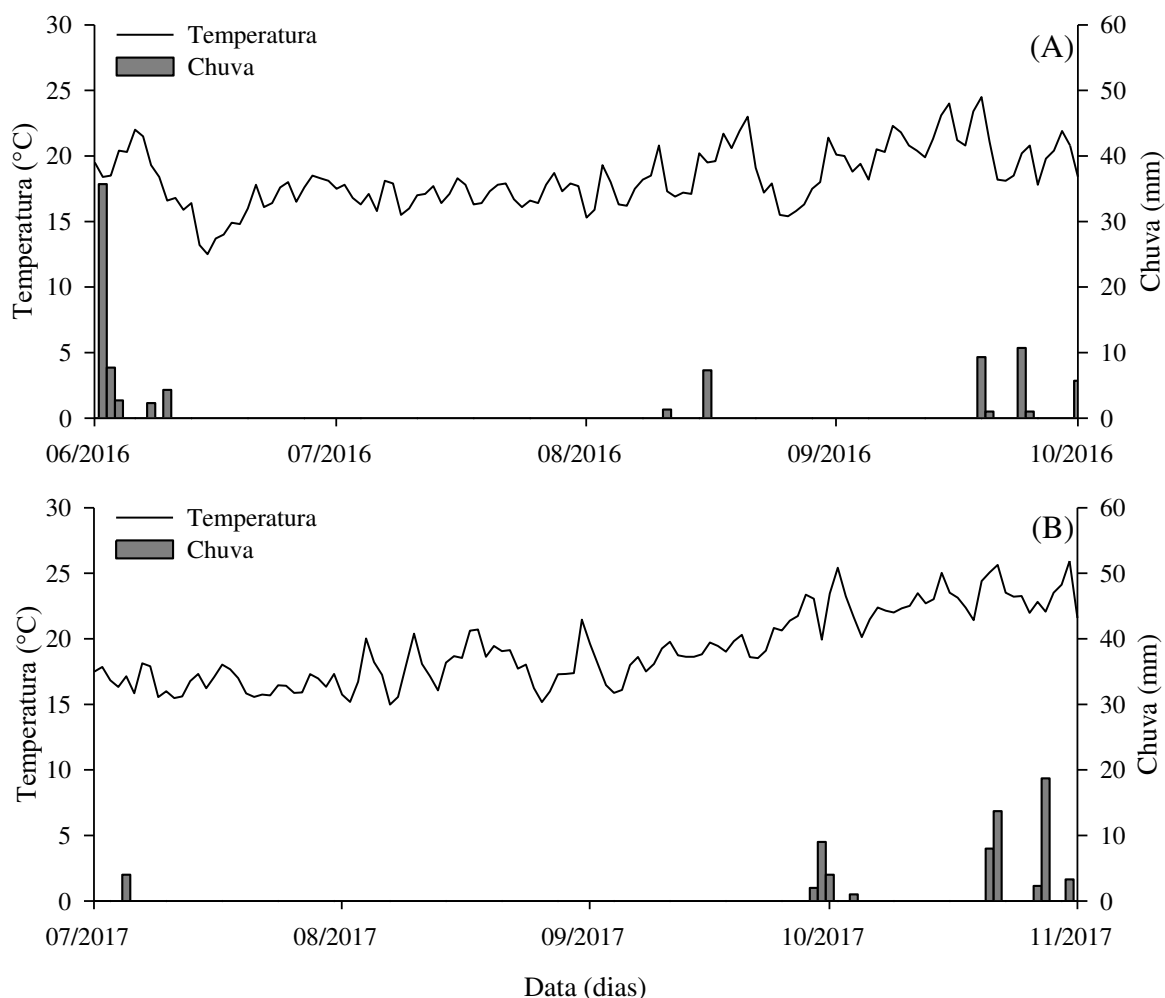


Figura 2. Temperatura média e precipitação durante o experimento para o ano de 2016 (A) e 2017 (B) em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

A radiação solar e a evapotranspiração média durante o experimento foram de 16,0 e 19,3 MJ m⁻² e 3,4 mm d⁻¹, respectivamente (Figura 3A e 3B).

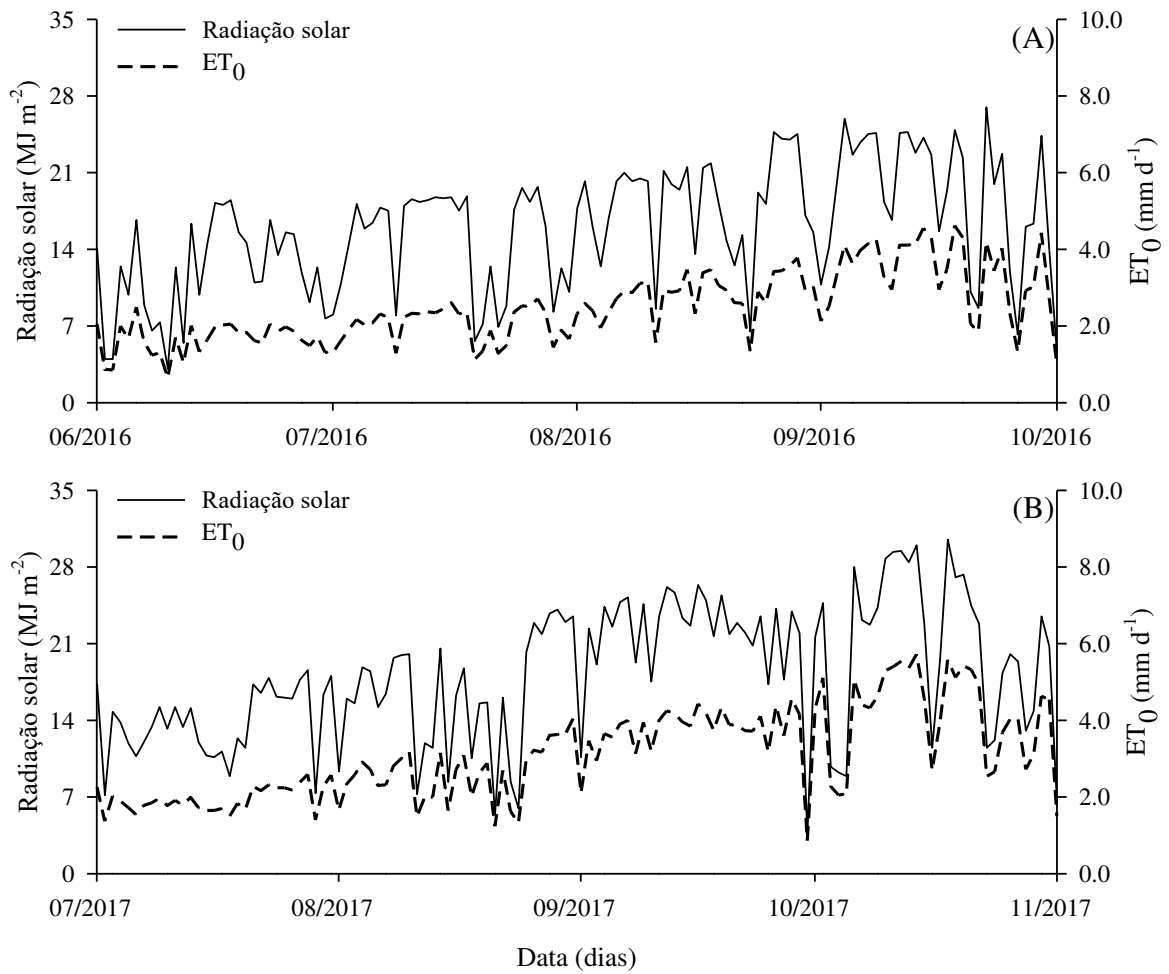


Figura 3. Radiação solar e evapotranspiração de referência (ET₀) durante o experimento para o ano de 2016 (A) e 2017 (B) em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

A umidade relativa do ar média, durante o período experimental, foram 83 e 77% e o déficit de pressão de vapor médio 0,78 e 0,96 kPa, respectivamente (Figura 4A e 4B).

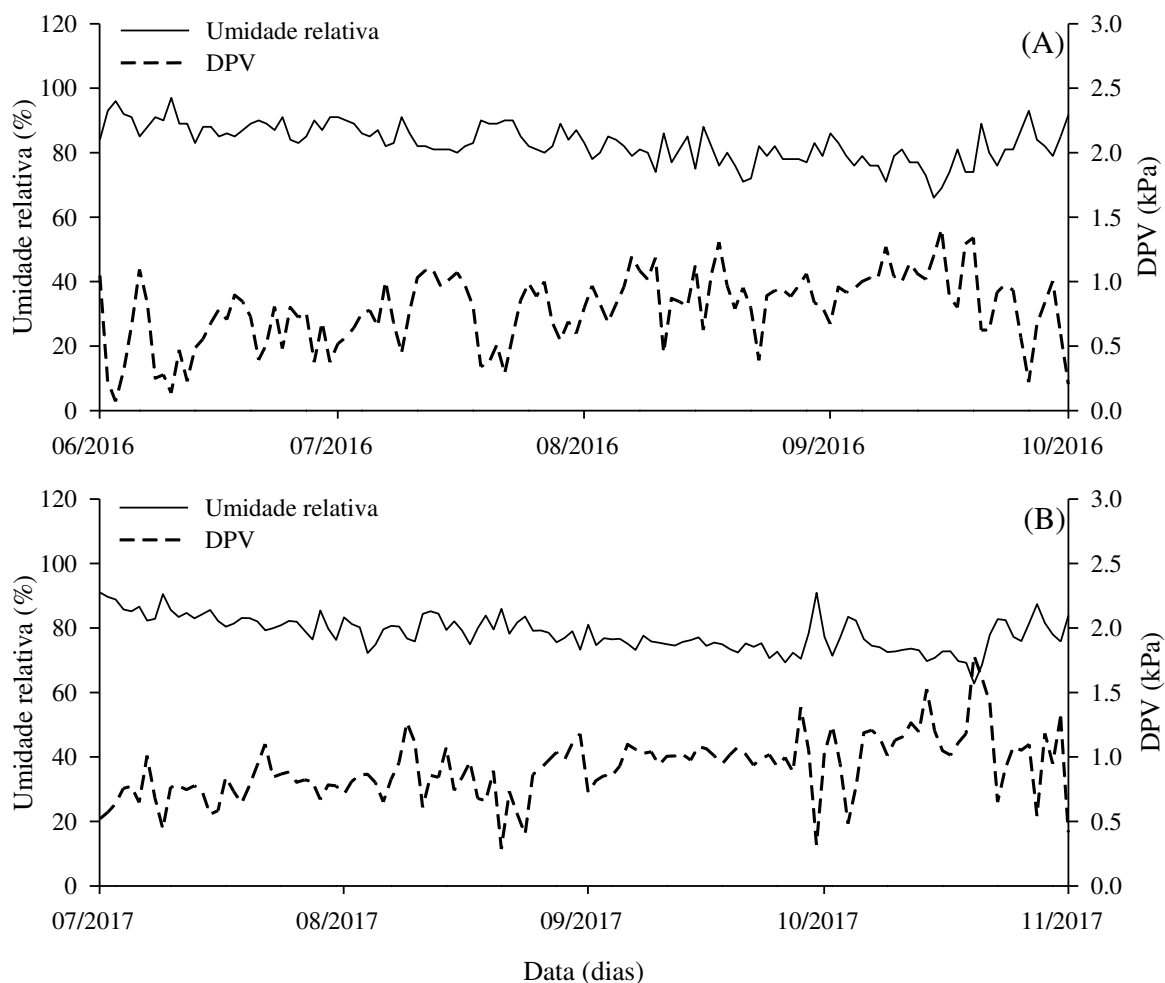


Figura 4. Umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor durante o experimento para o ano de 2016 (A) e 2017 (B) em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Os tratamentos foram iniciados 14 e 17 dias após o transplântio (DAT) para o experimento I e II, respectivamente, com acúmulo de graus dias (GDA) de 119,0 °C. Ao término da fase de pagamento das mudas de tomateiro com acúmulo (GDA) de 119 °C e de 306, 661 e 1012 °C na segunda (desenvolvimento), terceira (produção) e quarta (colheita) fases (DELAZARI et al., 2016).

3.8. Delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados com cinco repetições. A área experimental era composta por 20,0 parcelas de 18,0 m² e área total de 360 m², considerando as duas linhas das extremidades como bordaduras e as centrais utilizadas para avaliação. As parcelas experimentais possuíam seis metros de comprimento

e três metros de largura, sendo compostas por 60,0 plantas cada e 20,0 plantas centrais.

3.9. Características avaliadas

3.9.1. Produtividade e eficiência no uso da água

Os frutos foram colhidos e utilizados para avaliação da produtividade de frutos (PROD, em t ha⁻¹).

A eficiência do uso da água (EUA) foi definida pela relação entre a produtividade de matéria seca (PROD_{ms}) e a quantidade de água aplicada (V) com a equação 3:

$$EUA = \frac{PROD_{ms}}{V} \quad (3)$$

em que:

EUA – eficiência do uso da água, (kg m⁻³);

PROD_{ms} – produtividade de matéria seca (kg ha⁻¹);

V – volume de água aplicado (m³ ha⁻¹).

3.9.2. Trocas gasosas

A fotossintética líquida (An), transpiração (Tr) e a condutância estomática (gs) foram medidas no intervalo de: 8:00 – 11:00 h, em condições de campo em dias ensolarados, com o analisador IRGA (LI-6400, LI-COR Biosciences, Inc Lincoln Nebraska) no segundo par de folíolos da terceira folha em um folíolo de uma planta por unidade experimental, registrando-se cinco leituras sucessivas. A Análise foi fixado sempre que iniciar o florescimento. A umidade do ar e a temperatura oscilaram conforme as condições do ambiente, já a luz actínica foi constante com intensidade de 1000 μmol m⁻² s⁻¹ e a concentração de CO₂ de 400 μmol mol⁻¹ (ANTÔNIO, 2013).

3.9.3. Temperatura foliar e Déficit de pressão de vapor

A temperatura foliar foi medida utilizando sensores de temperatura a infravermelho

(MLX90614, Milexis, Rozendaalstraat Belgica) no sistema Arduino, os quais foram instalados a 10 cm do dossel da planta. A temperatura das folhas foi aferida a cada 15 min durante todo o ciclo da cultura. O sensor de temperatura via infravermelho utilizava um campo de visada de 15° e estava equipado com um filtro espectral na faixa de 5,5 a 14,0 µm, com exatidão de +/- 0,5 °C e resolução de 0,1 °C. O centro de visada do sensor de temperatura via infravermelho foi posicionado a uma altura de 4 m e inclinação de 45° em relação ao plano horizontal com orientação na direção sul. A emissividade selecionada para o dossel vegetativo da cultura foi igual a 0,98.

A diferença entre a temperatura da folha e do ar ($T_{\text{foliar}} - T_{\text{ar}}$ em °C) foi medida utilizando sensores de temperatura via infravermelho que aferem a temperatura da folha, com leituras feitas a partir das 12:00 h, e a temperatura do ar foi obtida por meio de estação meteorológica implantada no experimento (E5000, Irriplus Tecnologia e Manufatura Ltda, Viçosa-MG, Brasil).

O déficit de pressão de vapor (DPV) é a relação entre a pressão de saturação de vapor d'água no ar (e_s) e a pressão parcial de vapor d'água no ar (e_a). As equações 4, 5 e 6 foram utilizadas para calcular o déficit de pressão de vapor (ALLEN et al., 1998).

$$e_s = 0,6108 \times e^{\left[\frac{17,5 \times T}{237,3 + T} \right]} \quad (4)$$

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (5)$$

$$DPV = (e_s - e_a) \quad (6)$$

em que:

e_s – pressão de saturação de vapor d'água no ar (kPa);

T – temperatura do ar (°C);

e_a – pressão parcial de vapor d'água (kPa);

UR – umidade relativa do ar (%);

DPV – déficit de pressão de vapor d'água no ar (kPa).

3.9.4. Sistema radicular

Para amostragem do sistema radicular, foi utilizado um trado tipo sonda com 50 mm de diâmetro e 1,20 m de comprimento (GUAN et al., 2015; QUANQI et al., 2010; SHARMA et al., 2014). O ponto determinado a 0,10 m de distância da planta e perpendicularmente à linha de plantio (Figura 5A). Foram retiradas amostras nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm (Figura 5B). A amostragem foi feita no início da colheita dos frutos em uma planta por tratamento, com cinco repetições.

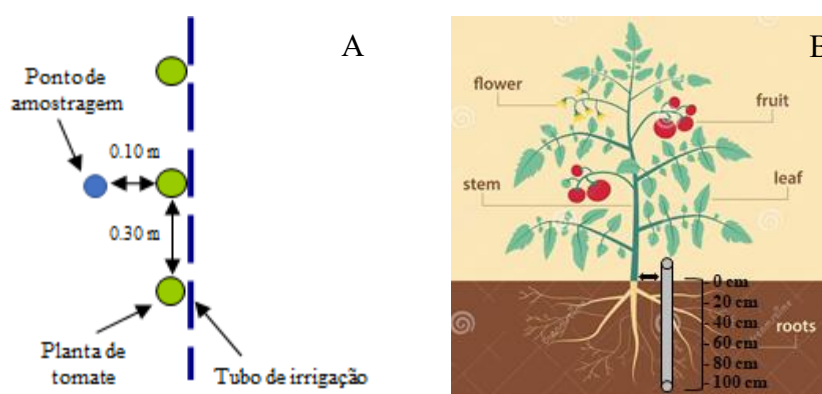


Figura 5. Posição de amostragem, em relação à linha de plantio (A) e a profundidade amostrada (B), para a avaliação do sistema radicular do tomateiro (fonte: dreamstime.com).

Após a retirada, as amostras de solo e raiz foram colocadas sobre uma peneira de malha de 2.0 mm e com auxílio de jatos de água foi feita a separação do solo e das raízes. As raízes de cada amostra foram submetidas a um scanner (Epson V700, Indonésia) para obtenção das imagens. Essas foram analisadas mediante o software WinRHIZO versão 5.0 (Regent Instruments Inc., Quebec City, Canadá). Avaliou-se a densidade de comprimento radicular (RLD, cm cm^{-3} de solo) e a densidade da área superficial radicular (RSD, $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ de solo) (GUAN et al., 2015; MOSADDEGHI; MAHBOUBI; SAFADOUST, 2009; QUANQI et al., 2010).

3.9.5. Análise de fitohormônios

Os hormônios e o aminoácido prolina foram extraídos das folhas seguindo-se a metodologia descrita por Müller and Munné-Bosch (2011) com modificações. Cerca de 110

mg de tecido fresco foi macerado em nitrogênio líquido seguida da adição de 300 μL de solução extratora (metanol:isopropanol:ácido acético 20:79:1). As amostras foram agitadas em vortex (4 vezes por 20 segundos), sonicadas (5 min) e mantidas no gelo (30 minutos). Após centrifugação (13000g, 10 min a 4 °C), 250 μL do sobrenadante foi coletado e transferido para novo tubo. Ao pellet resultante, repetiu-se o processo de extração e, em seguida, juntou-se os sobrenadantes. Ao final foi feita nova centrifugação (20000g, 5 min a 4 °C) para remoção de restos de tecido em suspensão.

O extrato obtido foi automaticamente injetado (5 μL) no sistema LC-MS/MS utilizando o equipamento modelo Agilent 1200 Infinity Series acoplado ao espectrômetro de massa tipo triplo quadrupolo (QqQ), modelo 6430 Agilent Technologies. A separação cromatográfica foi realizada utilizando-se a coluna Zorbax Eclipse Plus C18 (1.8 μm , 2,1 x 50 mm) (Agilent) em série com uma coluna guarda Zorbax SB-C18, 1.8 μm (Agilent). A fase móvel consistiu em: (A) ácido acético 0,02% em água e (B) ácido acético 0,02% em acetonitrila em um gradiente de tempo/%B de: 0/5; 11/60; 13/95; 17/95; 19/5; 20/5. Um fluxo de 0,3 mL min^{-1} e temperatura da coluna de 23 °C foram utilizados.

No espectrômetro de massa foram utilizadas fonte de ionização ESI (Electrospray Ionisation) com as seguintes condições: temperatura do gás de 300 °C, taxa de fluxo de nitrogênio de 10 L min^{-1} , pressão do nebulizador de 35 psi e a voltagem do capilar de 4000 V.

O equipamento foi operado no modo MRM (multiple reaction monitoring), no qual monitorou-se as massas do íon precursor/fragmento estabelecidas mediante testes de fragmentação de cada molécula: citocinina (zeatina) (220/136), etileno via ácido 1-carboxílico-1-amino ciclopropano (ACC) (102,1/56,2), ABA(263/153), espermina (203/83,1), putrescina (89/72,1) e prolina (116/70). Citocinina, ACC, espermina, putrescina e Prolina foram escaneados no modo positivo, enquanto ABA, no modo negativo. Uma curva de calibração (0,1 a 400 ng) utilizando os respectivos padrões de cada hormônio foi feita para a obtenção da quantificação absoluta. Os dados gerados foram analisados no software “MassHunter Workstation” para obtenção da área dos picos de cada hormônio nas amostras e os resultados foram expressos em ng g^{-1} de tecido fresco para ABA, citocinina, ACC, e putrescina já para espermina foi expresso em nmol g^{-1} de tecido fresco e prolina em mg g^{-1} de tecido fresco.

3.9.6. Discriminação dos isótopos de carbono

Foi utilizada a terceira folha totalmente expandida desenvolvida durante a aplicação dos tratamentos para análise isotópica. As amostras foram secas a 65 °C até peso constante e moídas até uma textura fina utilizando um moinho ZM200 (Retsch, Alemanha). A razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (R_{amostra}) das amostras de folhas foi analisada utilizando o Analisador Automático de Carbono e Nitrogênio - Sólido e Líquido (ANCA-SL, SerCon, Reino Unido) em interface com um Espectrômetro de Massa de Razão Isotópica (IRMS) (20-20, SerCon, Reino Unido). A composição isotópica foi relatada como $\delta^{13}\text{C}$ em ‰ usando Vienna Pee Dee Belemnite (V-PDB) como padrão internacional ($R_{\text{padrão}}$) e calculada pela equação 7 (FARQUHAR; EHLERINGER; HUBICK, 1989; WEI et al., 2016).

A discriminação de isótopos de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$, ‰) foi calculada como equação 8 e foi adotado o valor da composição isotópica de carbono do ar ($\delta^{13}\text{C}_{\text{ar}}$) de -8,0 ‰ (BRUGNOLI; FARQUHAR, 2000; LANARI et al., 2018).

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{amostra}} = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (7)$$

$$\Delta^{13}\text{C} = \left[\frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{ar}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{planta}}}{1 + \delta^{13}\text{C}_{\text{planta}}} \right] \times 1000 \quad (8)$$

em que:

$\delta^{13}\text{C}_{\text{amostra}}$ – Composição isotópica de carbono da amostra (‰);

R_{amostra} – razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra;

$R_{\text{padrão}}$ – razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ do padrão;

$\Delta^{13}\text{C}$ – discriminação isotópica do carbono (mm d⁻¹);

$\delta^{13}\text{C}_{\text{ar}}$ – Composição isotópica de carbono do ar (‰);

3.10. Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro tratamentos (FI₁, FI₃, FI₅ e FI₇) e cinco repetições, em cada época (2016 e 2017). Foi

realizado a análise de variância conjunta dos experimentos, com objetivo de testar a interação entre épocas e as frequências de irrigação. As médias dos dados foram comparadas pelo teste de Tukey a 1,0 e 5,0% de probabilidade. Alguns parâmetros foram analisados por regressão linear e a significância dos coeficientes de regressão analisados com o teste “t” a 0,1 a 5,0% de significância com o programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

4. RESULTADOS

4.1. Teor de água no solo

Analisando a variação do teor de água em diferentes profundidades foi possível visualizar que na FI₁ a variação ocorreu na camada de 0-20 cm e uma pequena proporção na camada de 20-40 (Figura 6A) e analisando o FI₇ a camada de 0-20 teve uma redução considerável no teor de água e também ocorreu variação nas camadas de 20-40 e de 40-80 cm mostrando maior aproveitamento da água do solo em profundidade (Figura 6D).

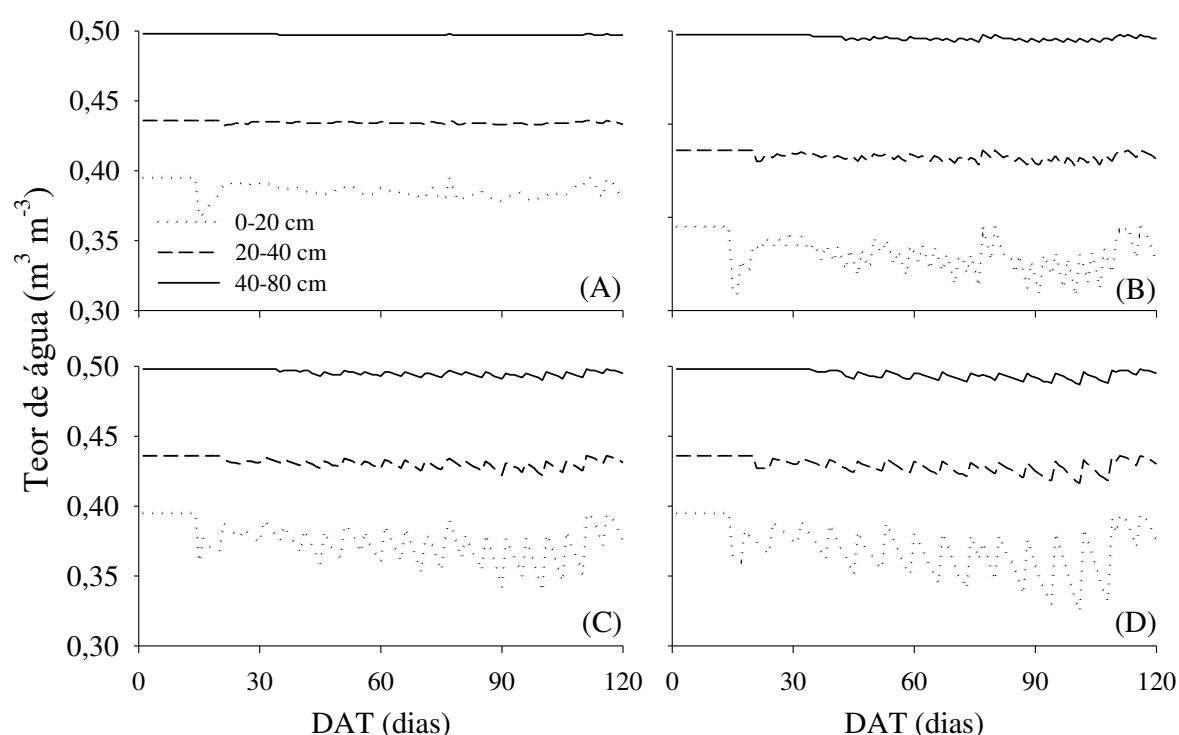


Figura 6. Teor de água na camada de 0-20, 20-40 e 60-80 cm para (A) frequência de irrigação diária, (B) a cada três dias, (C) a cada cinco dias e (D) para sete dias sem irrigação, durante o ciclo de cultivo.

4.2. Produtividade, eficiência no uso água, tocas gasosas

Para as características produtividade (PROD), eficiência no uso da água (EUA), fotossíntese líquida (A_n), condutância estomática (g_s) e transpiração (Tr) não houve interação significativa entre a frequência de irrigação e a época de cultivo (Tabela 4). Houve efeito significativo para a frequência de irrigação (FI) para essas características analisadas

(Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância das características produtividade (PROD), eficiência no uso da água (EUA), fotossíntese líquida (An), condutância estomática (gs) e transpiração (Tr).

Fonte de Variação	Quadro Médio					
	GL	PROD	EUA	An	gs	Tr
Bloco	4	137,16	0,036	2,48	133,95	0,16
Freq. Irrigação (Freq)	3	8184,16**	2,74**	104,91**	46956,78**	6,79**
Época (Ep)	1	50,27 ^{ns}	0,038 ^{ns}	2,22 ^{ns}	203,17 ^{ns}	0,46 ^{ns}
Ep x Freq	3	26,00 ^{ns}	0,003 ^{ns}	0,42 ^{ns}	84,32 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Erro	28	97,13	0,026	0,88	1750,68	0,12
CV (%)		7,64	7,72	4,57	12,22	7,62
Média Geral		128,94	2,09	20,56	342,40	4,57

FV: Fonte de variação; GL: grau de liberdade; ^{ns} Não significativo, *Significativo a 0,05 e ** significativo a 0,01 de probabilidade, pelo teste de F.

A Tabela 5 mostra houve o efeito significativo do fator frequência de irrigação sobre a PROD, evidenciando que o uso da frequência FI₇ proporcionou maior produtividade, 157,84 t ha⁻¹, diferindo dos restantes das frequências, que obtiveram 92,73, 120,72 e 144,47 t ha⁻¹, FI₁, FI₃ e FI₅, respectivamente. EUA diferiu entre as frequências de irrigação e a FI₇ proporcionou o maior aproveitamento de água de 2,65 kg m⁻³ e FI₁ a menor 1,44 kg m⁻³. Como a quantidade de água aplicada (irrigação + precipitação) foram aproximadamente iguais, o que proporcionou esta diferença foi a produtividade (Tabela 5).

Tabela 5. Valores médios de produtividade (PROD), eficiência no uso da água (EUA) fotossíntese líquida (An), condutância estomática (gs) e transpiração (Tr) em quatro frequências de irrigação (Freq Irrigação).

Freq Irrigação	PROD (t ha ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)	An (μmol m ⁻² s ⁻¹)	gs (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Tr (mmol m ⁻² s ⁻¹)
FI ₁	92,73 d	1,44 d	17,10 d	282,31 c	3,61 d
FI ₃	120,72 c	1,93 c	18,75 c	303,98 bc	4,25 c
FI ₅	144,47 b	2,33 b	22,11 b	346,09 b	4,91 b
FI ₇	157,84 a	2,65 a	24,27 a	437,20 a	5,51 a

*Médias seguidas com a mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%. Viçosa, MG, 2019.

A fotossíntese líquida (An) foi superior nas plantas submetido a FI₇, com 24,27 μmol

CO₂ m⁻² s⁻¹, diferindo significativamente das plantas submetidas das outras frequências de irrigação (Tabela 5). An foi menor (17,10 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) para a FI₁ em seguido pela FI₃ (18,75 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) e FI₅ (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹).

Em relação a condutância estomática (gs) foi observado que esta variável teve comportamento similar à An, onde as maiores foram registadas na FI₇ e FI₅, com 437,20 e 346,09 mmol m⁻² s⁻¹, respectivamente, mostrando diferenças significativas em relação a FI₃ (303,98 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹) e FI₁ (282,31 mmol m⁻² s⁻¹) (Tabela 5). Da mesma forma, a transpiração (Tr) mostrou o mesmo padrão de resposta da An e gs, mostrando as maiores médias de Tr nas FI₇ e FI₅, com 5,51 e 4,91 mmol m⁻² s⁻¹, respetivamente, e menores para FI₃ e FI₁, com 4,25 e 3,61 mmol m⁻² s⁻¹, respetivamente (Tabela 5).

4.4. Índice de área foliar, discriminação isotópica do carbono, temperatura foliar, sistema radicular

Para as características índice de área foliar (IAF), discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}C$), diferença temperatura do ar e foliar ($\Delta_{ar-foliar}$), densidade do comprimento radicular (DCR) e densidade da área específica radicular (DSR) não houve interação significativa entre a frequência de irrigação e a época de cultivo (Tabela 6). Houve efeito significativo para a frequência de irrigação (FI) para essas características analisadas (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância das características índice de área foliar (IAF), discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}C$), diferença temperatura do ar e foliar ($\Delta_{ar-foliar}$), densidade do comprimento radicular (DCR) e densidade da área específica radicular.

Fonte de Variação	Quadro Médio					
	GL	IAF	$\Delta^{13}C$	$\Delta_{ar-foliar}$	DCR	DSR
Bloco	4	1,80	0,90	0,77	0,24	0,0040
Freq. Irrigação (Freq)	3	23,88**	8,87**	13,43**	7,29**	0,050**
Época (Ep)	1	0,058 ^{ns}	2,24 ^{ns}	0,014 ^{ns}	0,088 ^{ns}	0,0058 ^{ns}
Ep x Freq	3	0,066 ^{ns}	0,00084 ^{ns}	0,099 ^{ns}	0,0032 ^{ns}	0,000020 ^{ns}
Erro	28	0,86	0,62	0,31	0,11	0,0014
CV (%)		19,77	3,35	22,90	8,02	7,89
Média Geral		4,68	23,43	2,42	4,22	0,47

FV: Fonte de variação; GL: grau de liberdade; ^{ns} Não significativo, *Significativo a 0,05 e ** significativo a 0,01 de probabilidade, pelo teste de F.

O índice da área foliar (IAF) apresentaram as maiores médias nas frequências FI₇

(6,42 m² m⁻²) e FI₅ (5,38 m² m⁻²) quando comparados a FI₃ (4,07 m² m⁻²) e FI₁ (2,87 m² m⁻²) (Figura 7).

De acordo a Tabela 7, a FI₇ apresenta a maior discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) em relação as outras frequências de irrigação.

A diferença entre a temperatura do ar e foliar ($\Delta_{\text{ar-foliar}}$) foi maior na frequência de irrigação de sete dias (3,86 °C) e menor na frequência diária (1,08 °C), mostrando que FI₇ apresentou temperatura foliar menor que do ambiente (Tabela 7).

Tabela 7. Valores médios de índice de área foliar (IAF), discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) diferença entre temperatura do ar e foliar ($\Delta_{\text{ar-foliar}}$), densidade de comprimento radicular (DCR) e da área superficial radicular (DSR) em quatro frequências de irrigação.

Freq Irrigação	IAF (m ² m ⁻²)		$\Delta^{13}\text{C}$ (‰)		$\Delta_{\text{ar-foliar}}$ (°C)		DCR (cm cm ⁻³)		DSR (cm ² cm ⁻³)	
FI ₁	2,87	c	22,33	c	1,08	c	3,36	c	0,39	c
FI ₃	4,07	b	23,19	bc	2,10	b	3,78	c	0,44	b
FI ₅	5,38	a	23,62	b	2,66	b	4,57	b	0,48	b
FI ₇	6,42	a	24,59	a	3,86	a	5,23	a	0,55	a

*Médias seguidas com a mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%. Viçosa, MG, 2019.

A temperatura foliar em FI₁, FI₃, FI₅ e FI₇ foram sempre menores que a temperatura do ar durante as horas do dia. Nos horários de maior déficit de pressão de vapor (11:00 as 15:00) a temperatura foliar se elevou devido maior quantidade de radiação solar direta, mas sempre ficando abaixo da temperatura do ar, mostrando que os tratamentos também mantiveram a taxa transpiratória considerável nestes horários (Figura 7).

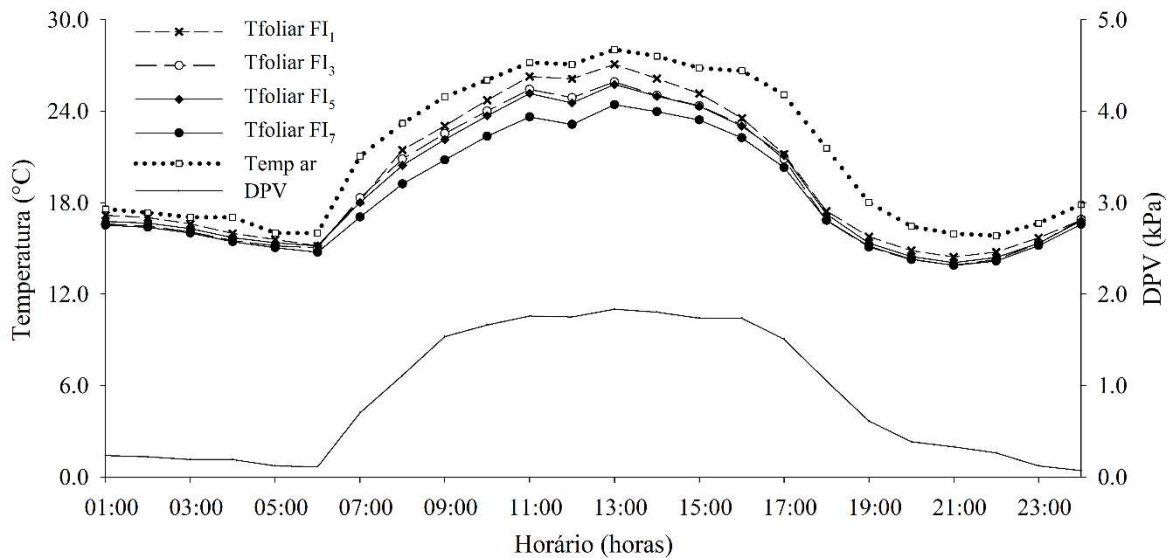


Figura 7. Temperatura foliar para cada tratamento, temperatura do ar e Déficit Pressão de Vapor para as 24 horas.

Na Tabela 7 são apresentadas comparações entre a densidade de comprimento radicular (DCR) e densidade da área superficial radicular (DSR) em função da frequência de irrigação. Podemos verificar que a FI7 proporcionou maior DCR ($5,23 \text{ cm cm}^{-3}$) e DSR ($0,55 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) em comparado a FI1 ($3,36 \text{ cm cm}^{-3}$ e $0,39 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$, para DCR e DSR, respectivamente).

As Figuras 8A mostra a densidade do comprimento radicular. Pode-se constatar que a raiz do tomateiro desceu até aos 100 cm. No entanto, pode-se constatar que o FI7 apresentou maior densidade de comprimento radicular (DCR) a partir da camada 20 cm em relação as outras frequências de irrigação. Para a Densidade da área superficial radicular (DSR) apresentou o mesmo comportamento que a DCR evidenciando que FI7 sempre apresentou maior área superficial desde a camada de 20 cm do solo (Figura 8B).

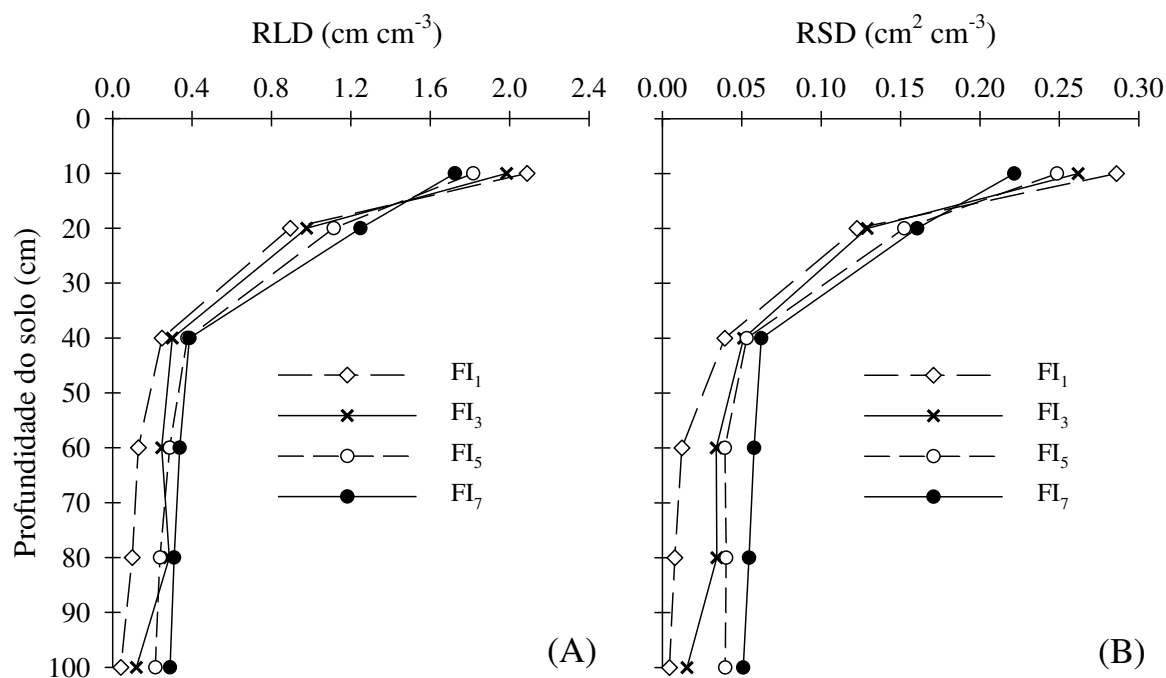


Figura 8. Densidade do comprimento (A) e densidade da área superfície radicular (B) em função da frequência de irrigação.

4.7. Fitohormônios e osmorreguladores

Para as características ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC), citocinina (CIT) e ácido abscísico (ABA) não houve interação significativa entre a frequência de irrigação e a época de cultivo (Tabela 8). Houve efeito significativo para a frequência de irrigação (FI) para essas características analisadas (Tabela 8).

Tabela 8. Resumo da análise de variância das características ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC), citocinina (CIT) e ácido abscísico (ABA).

Fonte de Variação	GL	Quadro Médio		
		ACC	CIT	ABA
Bloco	4	30,10	1697,89	120,08
Frequência (Freq)	3	812,75**	82244,33**	1013,35**
Época (Ep)	1	18,60 ^{ns}	386,39 ^{ns}	121,14 ^{ns}
Ep x Freq	3	0,67 ^{ns}	324,87 ^{ns}	5,31 ^{ns}
Erro	28	14,31	3505,26	54,49
CV (%)		7,39	18,99	16,45
Média Geral		51,21	311,77	44,88

FV: Fonte de variação; GL: grau de liberdade; ^{ns} Não significativo, *Significativo a 0,05 e ** significativo a 0,01 de probabilidade, pelo teste de F.

A Tabela 9 mostra houve o efeito significativo do fator frequência de irrigação sobre a ACC, evidenciando que o uso da frequência FI₇ proporcionou menor teor de ACC, 42,05 ng g⁻¹, diferindo dos restantes das frequências, que obtiveram 62,55, 53,95 e 46,31 ng g⁻¹, FI₁, FI₃ e FI₅, respectivamente.

A citocinina (CIT) apresentou a menor média na frequência FI₇ (199,30 ng g⁻¹) e 410,66 ng g⁻¹ na FI₁ (Figura 6). Já o ácido abscísico (ABA) a FI₇ apresentou a menor média entres os tratamentos (33,50 ng g⁻¹) e a FI₁ apresentou a maior média (57,28 ng g⁻¹) (Tabela 9).

Tabela 9. Valores médios de ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC), citocinina (CIT) e ácido abscísico (ABA) em quatro frequências de irrigação (Freq Irrigação).

Freq Irrigação	ACC (ng g ⁻¹)		CIT (ng g ⁻¹)		ABA (ng g ⁻¹)	
FI ₁	62,55	a	410,66	a	57,28	a
FI ₃	53,95	a	351,37	ab	47,55	b
FI ₅	46,31	b	285,77	b	41,19	bc
FI ₇	42,05	c	199,30	c	33,50	c

*Médias seguidas com a mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5%. Viçosa, MG, 2019.

No tratamento com menor frequência de irrigação obteve-se menor concentração de ABA (41,2 ng g⁻¹) e no tratamento de maior frequência obteve-se a maior concentração (123,3 ng g⁻¹) (Figura 13A). O tratamento de menor frequência obteve menor concentração de citocinina (244,5 ng g⁻¹), e o tratamento de maior frequência obteve a maior concentração (461,0 ng g⁻¹) (Figura 13B).

Na Figura 9A é apresentado a concentração de espermina que teve o comportamento linear decrescente, em que a maior concentração de espermina foi maior em FI₁ (0,145 ng g⁻¹) e a menor com FI₇ (0,109 ng g⁻¹).

Tanto putrescina (Figura 9B) quanto prolina (Figura 9C) tiveram comportamento linear e FI₁ proporcionaram a maior concentração (0,57 e 2,62 ng g⁻¹) e já para o FI₇ as menores concentrações (0,26 e 0,14 ng g⁻¹).

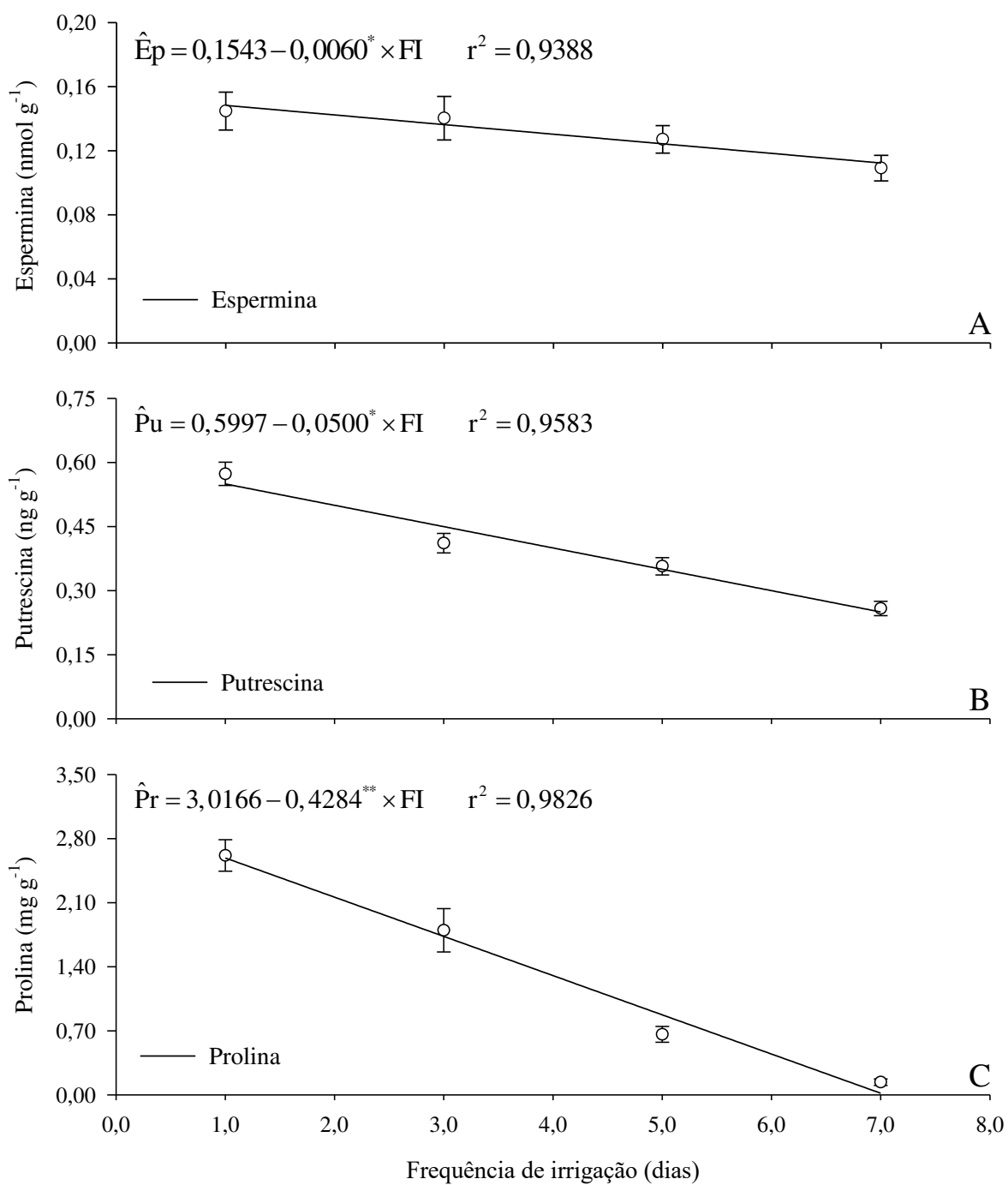


Figura 9. Espermina (A), Putrescina (B) e Prolina (C) na folha em função da frequência de irrigação. ***Significativo a 0,1%; **Significativo ao nível de 1,0% pelo teste “t”. Intervalo de confiança 95% (IC 95%).

5. DISCUSSÃO

Na frequência de irrigação semanal, as plantas desenvolveram mecanismos de aclimação para tolerar os dias com baixa disponibilidade hídrica nas camadas superficiais (0-20 cm). Inicialmente pode ter ocorrido o ajuste osmótico, o que proporcionou o aumento de osmorreguladores nas folhas (SHOOSHTARIAN et al., 2011), e posteriormente o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, possibilitando o aumento do volume de exploração do solo absorvendo mais água e nutrientes (Figura 6D), devido o maior volume de raiz, como pode ser visualizado na Figura 8 (MÜLLER; RANQUET BOULEAU; PERONA, 2016; SINCLAIR et al., 2011).

Receber todo o volume de água, relativo a evapotranspiração de uma semana de uma única vez, estimulou a maior emissão de raízes em profundidades (Figura 8A e B), bem abaixo dos 40 cm de profundidade, onde, normalmente em cultivos do tomateiro seria o perfil trabalhado. Ademais, esses fatores podem ter contribuído para o maior acúmulo de biomassa pelas plantas, uma vez que nos horários de aumento do déficit de pressão de vapor (DPV) foi possível manter a atividade estomática e o fluxo de CO₂.

Conforme relatado por ALMEIDA et al., 2017, a primeira condição para que as plantas mantenham os estômatos abertos durante é que elas recebam água sem restrições ao longo do dia e do ciclo de cultivo. Em consequência da satisfação desta condição, é possível obter maior fotossíntese, condutância estomática, transpiração e maior eficiência de carboxilação da Rubisco. FI₇ teve a maior eficiência em utilizar água, uma vez que teve aumento da fixação de CO₂ com praticamente a mesma aplicação de água. Isto mostra a importância de modificar o sistema de cultivo para melhor aproveitamento dos insumos (água, nutrientes, CO₂ e luz) e explorar o potencial genético da planta.

A irrigação semanal com o maior desenvolvimento radicular possibilitou um maior desenvolvimento da parte aérea sendo exemplificado com o resultado do IAF que foi maior como mostrado na Tabela 7, em que a frequência de sete dias entre irrigação possibilitou maior área foliar. A combinação do maior desenvolvimento radicular e IAF possibilitou maiores aberturas estomáticas e com isto maior taxa de assimilação líquida de CO₂ garantiu que FI₇ obtivesse a maior produtividade em comparados as outras frequências de irrigação.

A temperatura foliar da FI₇ se manteve sempre dentro da faixa ideal, entre 23 a 25 °C. Já as demais frequências de irrigação, nos horários de maior temperatura do ar e maior DPV, apresentou temperatura foliar sempre acima do intervalo ideal da atividade da Rubisco (Figura 7). Manter a temperatura foliar dentro do intervalo ideal da enzima é fundamental

para a obtenção de maior eficiência produtiva, uma vez que o aumento da temperatura foliar pode afetar diretamente na atividade da Rubisco, o que leva a redução da carboxilação e aumentando da fotorrespiração (RASHID et al., 2018).

Altas temperaturas e déficit de pressão de vapor podem reduzir a assimilação líquida através de efeitos nos componentes bioquímicos e difusivos da fotossíntese (PERDOMO et al., 2016) e o VPD próximo de 2,0 kPa pode até impedir o crescimento da cultura limitando a transpiração (FLETCHER; SINCLAIR; ALLEN JR, 2007; RODRIGUEZ; SANDRAS, 2007), o que resultaria em redução de produtividade. No horário de maior radiação incidente e com um alto poder calorífico as plantas normalmente fecham seus estômatos para evitar perda excessiva de água pela transpiração. Nestas situações, onde as raízes não são capazes de repor toda a água perdida na mesma intensidade, as plantas reduzem drasticamente a condutância estomática, fazendo com que a temperatura foliar aumente (HAQUE et al., 2017; LAKE et al., 2017; NANKISHORE; FARRELL, 2016). Este resultado mais uma vez comprova que a cultura do tomate foi capaz de aclimatar a condição de redução de água livre no perfil do solo.

Segundo KONRAD et al., (2005), a eficiência da carboxilação da Rubisco possibilita estimar os fatores não-estomáticos que estariam afetando o rendimento fotossintético, e conseqüentemente a produtividade, tendo ação na enzima Rubisco, fatores estes que podem estar relacionados ao ambiente, ou mesmo a própria planta (CAMILLI et al., 2007). A redução na eficiência da RUBISCO observada pelas plantas submetidas ao manejo tardio pode ser devido aumento na resistência mesofílica causado pelo fechamento estomático, ocasionando o aumento da atividade oxigenase da Rubisco com conseqüente aumento da fotorrespiração, e redução da fotossíntese (KRON; SOUZA; RIBEIRO, 2008). A discriminação isotópica de carbono das plantas mostraram ser influenciadas pelo tipo de frequência de irrigação, evidenciando que os aumentos na taxa fotossintética foram devidos a fatores estomáticos e também entre as concentrações intercelular e atmosférica de CO₂ (FARQUHAR; EHLERINGER; HUBICK, 1989; LANARI et al., 2018).

Outro indício da redução da fotossíntese ocasionada pela frequência de irrigação diário foi o aumento da concentração do ácido abscísico (ABA) e ácido 1-aminociclopropano carboxílico (ACC) na folha, como conseqüência da resposta direta do sistema radicular ao déficit hídrico no solo, promovendo a redução da abertura estomática e transpiração, (VERSLUES, 2016; YAN; LI; LIU, 2017). YAN; LI; LIU (2017), apontam que reduções na condutância estomática em resposta à redução do potencial hídrico do solo são devidas principalmente ao fechamento parcial estomático induzido pela sinalização química

da raiz para parte aérea, principalmente pelo ABA. No entanto, as respostas do ABA e ACC mais relatadas ocorrem sob estresse severo (CLAEYS; INZE, 2013). POSPÍŠILOVÁ et al.,(2005) apontam reduções de níveis de citocinina com o aumento do nível do ABA e a diminuição da condutância estomática, especialmente sob déficit hídrico, levando ao decréscimo da fotossíntese, senescência foliar e inibição do crescimento.

A estabilidade osmótica das plantas submetidas as FI₇ e FI₅ mostrado pela concentração dos osmorreguladores (prolina e putrescina), evidencia que estas plantas não se ajustaram osmoticamente como forma de reduzir a perda de água. Os osmorreguladores normalmente são abundantes nas plantas, no entanto, sob condições de estresse por temperatura, salinidade e por falta de água ocorre o aumento significativo da produção para reduzir danos ocasionados por esses estresses (GONZALEZ-AGUILAR et al., 1997; TANOU et al., 2014; YAMAGUCHI et al., 2007). No entanto, concentrações encontradas nas plantas da FI₁, evidenciam que estas plantas tiveram que se ajustar osmoticamente a uma situação de déficit hídrico no solo. MARIJUAN; BOSCH (2013), apontando que o ajuste osmótico é um dos mecanismos fisiológicos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, sob baixo potencial hídrico no solo.

A manutenção do equilíbrio entre a quantidade de água e a concentração de prolina nas células vegetais é importante para o funcionamento normal destas. Em condições de redução da água na planta, é aumentada a concentração de prolina como resposta da planta, ajustando osmoticamente as células impedindo as rupturas das atividades normais (KHAN et al., 2015).

No preparo do solo foi utilizado subsolagem para reduzir possíveis impedimentos físicos (CELIK; RAPER, 2016; SCHWARTZ; SMITH, 2016), acrescido da aplicação de calcário e gesso que possibilita o carregamento de nutrientes como cálcio, magnésio, potássio e enxofre para camadas mais profundas (CARMEIS FILHO et al., 2016; MOHAMMADSHIRAZI et al., 2017; NEIS et al., 2010). Com isso, foi possível avaliar a densidade do comprimento radicular (DCR) e a densidade da área de superfície da raiz (DSR), os quais são parâmetros pertinentes para a caracterização dos sistemas radiculares (AMATO; RITCHIE, 2002; DOUSSAN et al., 2006; JIA et al., 2018b).

O tratamento FI₇ proporcionou o maior desenvolvimento radicular, o que pode ser devido a indução ao crescimento radicular promovido com a redução da umidade na camada superficial na tentativa de buscar camadas mais estáveis em umidade (JIA et al., 2018b; LI et al., 2010; SHARMA et al., 2014). No FI₁ as camadas superficiais mantiveram sua umidade em praticamente todo o ciclo próximo à capacidade de campo e com os nutrientes

disponíveis as plantas. Dessa forma, essas plantas mantiveram o sistema radicular nas camadas superficiais, com cerca de 85,2% na camada de 0-20 cm e somente 14,8% na camada de 20-100 cm. No FI₇ a distribuição foi mais uniforme, apresentando 69,2% na camada de 0-20 cm e 30,8% na camada de 20-100 cm.

Os níveis de citocinina reduzem sob muitos tipos de estresses abióticos (BRENNER et al., 2012). Medições diretas confirmaram que os níveis de citocinina diminuem durante a redução do potencial hídrico do solo (HAVLOVA et al., 2008). No início da aplicação dos tratamentos as raízes do FI₇ sofreram estresse, o que provocou a redução dos níveis de zeatina levando ao aumento e desenvolvimento do sistema radicular buscando camadas do solo onde não ocorria a limitação de água (GHANEM et al., 2011; WERNER et al., 2010).

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições em que esta pesquisa foi desenvolvida, pode-se concluir que:

- A frequência de irrigação semanal (FI₇) proporcionaram melhorias nas trocas gasosas e plantas aclimatadas as condições de baixa disponibilidade de água no solo;

- O sistema radicular mais desenvolvido e de maior distribuição no perfil do solo foi obtido usando a frequência semanal;

- A maior produtividade de frutos e eficiência no uso da proporcionado pela frequência de irrigação semanal.

7. REFERÊNCIAS

ACEVEDO-OPAZO, C.; ORTEGA-FARIAS, S.; FUENTES, S. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 7, p. 956–964, 2010.

AGRIANUAL. **Anuário da Agricultura Brasileira**. FNP Consultoria e Agroinformativos, 435-439, 2016.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. United Nations FAO, Rome: Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

ALLEN, R. G. et al. **Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. United Nations FAO, Rome: Estudio FAO Riego y Drenaje 56, 2006.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, v. 28, n. 1, p. 17–34, 2009.

ALMEIDA, V. S. et al. Optimizing yields in tomato cultivation: maximizing tomato plant use of resources. In: HANDA, A.; MATTOO, A. (Eds.). . **Achieving sustainable cultivation of tomatoes**. 1.ed. Sawston - Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing Limited, 2017. p. 542.

ALVARENGA, M. A. R. **Tomate: produção em campo, casa-de-vegetação e em hidroponia**. 2ª ed. Lavras: Editora Universitaria UFLA, 2013.

AMATO, M.; RITCHIE, J. T. Spatial Distribution of Roots and Water Uptake of Maize (*Zea mays* L.) as Affected by Soil Structure. **Crop Science**, v. 42, n. 3, p. 773–780, 2002.

ANJUM, S. A. et al. Morphological , physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 9, p. 2026–2032, 2011.

ANTÔNIO, A. C. **Respostas ecofisiológicas do tomateiro no sistema Viçosa comparativamente a sistemas tradicionais em duas épocas de cultivo**. 2013. 60f. (Doutorado em Agronomia na área de Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa,

2013.

ASHRAF, M. et al. Drought Tolerance: Roles of Organic Osmolytes, Growth Regulators, and Mineral Nutrients. **Advances in Agronomy**, v. 111, p. 249–296, 2011.

BANJAW, D.; MEGERSA, H. Effect of Water Quality and Deficit Irrigation on Tomatoes Yield and Quality : A Effect of Water Quality and Deficit Irrigation on Tomatoes Yield and Quality in Ethiopia : A Review. **Journal of biology,agriculture and healthcare**, v. 7, n. 1, 2017.

BARBOSA, M. R. et al. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, n. 3, p. 453–460, 2014.

BRENNER, W. G. et al. Gene regulation by cytokinin in Arabidopsis. **Frontiers in Plant Science**, v. 3, n. 1, p. 1–22, 2012.

BRITO, L.; CASTRO, S. D. **Expansão da produção de tomate industrial no Brasil e em Goiás** *Conjuntura Econômica Goiana*. Goiania

BRUGNOLI, E.; FARQUHAR, G. D. Photosynthetic Fractionation of Carbon Isotopes. In: **Photosynthesis**. [s.l.] Springer, Dordrecht, 2000. p. 399–434.

BUI, H. H.; SERRA, V.; PAGÈS, L. Root system development and architecture in various genotypes of the Solanaceae family. **Botany**, v. 93, n. April 2015, p. 1–10, 2016.

CAMILLI, L. et al. Produtividade e Estimativa da Eficiência de Carboxilação in vivo da Enzima Rubisco em Girassol Ornamental Cultivado em Lodo de Esgoto. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. supl. 2, p. 858–860, 2007.

CARMEIS FILHO, A. C. A. et al. Impact of amendments on the physical properties of soil under tropical long-term no till conditions. **PLOS ONE**, v. 11, n. 12, p. 1–21, 2016.

CELIK, A.; RAPER, R. L. Comparison of various coulter-type ground-driven rotary subsoilers in terms of energy consumption and soil disruption. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 2, p. 250–259, 2016.

CHATER, C. et al. Elevated CO₂-Induced Responses in Stomata Require ABA and ABA Signaling. **Current Biology**, v. 25, n. 20, p. 2709–2716, 2015.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of botany**, v. 103, n. 4, p. 551–560, 2009.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. . **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. UFLA ed. Lavras: 2ª, 2005.

CLAEYS, H.; INZE, D. The Agony of Choice: How Plants Balance Growth and Survival under Water-Limiting Conditions. **Plant Physiology**, v. 162, n. 4, p. 1768–1779, 2013.

CORNIC, G.; MASSACCI, A. Leaf photosynthesis under drought stress. In: **Photosynthesis and the Environment**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 347–366.

CORREIA, K. G.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido a déficit hídrico. **Revista Biologia e Ciências da Terra**, v. 4, n. 2, p. 1–7, 2004.

CORTINA, C.; CULIÁÑEZ-MACIÀ, F. A. Tomato abiotic stress enhanced tolerance by trehalose biosynthesis. **Plant Science**, v. 169, n. 1, p. 75–82, 2005.

CUTLER, S. R. et al. Abscisic Acid: Emergence of a Core Signaling Network. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, n. 1, p. 651–679, 2010.

CVIKROVÁ, M. et al. Effect of drought and combined drought and heat stress on polyamine metabolism in proline-over-producing tobacco plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 73, p. 7–15, 2013.

DELAZARI, F. T. et al. Irrigation water management during the ripening of tomato aiming fruit quality. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 44, p. 4525–4531, 2016.

DOUSSAN, C. et al. Water uptake by plant roots: II – Modelling of water transfer in the soil root-system with explicit account of flow within the root system – Comparison with experiments. **Plant and Soil**, v. 283, n. 1–2, p. 99–117, 2006.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.

FAOSTAT. **FAOSTAT: Agricultural Production**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon Isotope Discrimination

and Photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 40, n. 1, p. 503–537, 1989.

FERNANDEZ, O. et al. Trehalose and plant stress responses: friend or foe? **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 7, p. 409–417, 2010.

FLETCHER, A. L.; SINCLAIR, T. R.; ALLEN JR, L. H. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered ‘slow-wilting’ and commercial soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, n. 2, p. 145–151, 2007.

FREITAS KONRAD, M. L. et al. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, v. 64, n. 3, p. 339–347, 2005.

GHANEM, M. E. et al. Root-synthesized cytokinins improve shoot growth and fruit yield in salinized tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 125–140, 2011.

GONZALEZ-AGUILAR, G. A. et al. Temperature and duration of water dips influence chilling injury, decay and polyamine content in “Fortune” mandarins. **Postharvest Biology and Technology**, v. 12, n. 1, p. 61–69, 1997.

GRZESIAK, S. et al. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. **Environmental and Experimental Botany**, v. 88, p. 2–10, abr. 2013.

GUAN, D. et al. Soil & Tillage Research Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 286–295, 2015.

GUANGCHENG, S. et al. Path analysis of sap flow of tomato under rain shelters in response to drought stress. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 2, p. 54–62, 2016.

HANSON, B. R.; MAY, D. M. Crop evapotranspiration of processing tomato in the San Joaquin Valley of California, USA. **Irrigation Science**, v. 24, n. 4, p. 211–221, 2006.

HAQUE, M. S. et al. Temperature variation under continuous light restores tomato leaf photosynthesis and maintains the diurnal pattern in stomatal conductance. **Frontiers in**

Plant Science, v. 8, n. 7, p. 1–13, 2017.

HAVLOVA, M. et al. The role of cytokinins in responses to water deficit in tobacco plants over-expressing trans -zeatin O-glucosyltransferase gene under 35S or SAG12 promoters. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, p. 341–353, 2008.

HAWORTH, M.; ELLIOTT-KINGSTON, C.; MCELWAIN, J. Co-ordination of physiological and morphological responses of stomata to elevated [CO₂] in vascular plants. **Oecologia**, v. 171, n. 1, p. 71–82, 2013.

HUI, Y. et al. Evaluation of tomato fruit quality response to water and nitrogen management under alternate partial root-zone irrigation. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 10, n. 5, p. 85–94, 2017.

IBGE. - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da Horticultura.

IJIMA, M. et al. Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems. **Environmental and Experimental Botany**, v. 31, n. 3, p. 333–342, 1991.

JIA, Q. et al. Soil & Tillage Research Mulch covered ridges affect grain yield of maize through regulating root growth and root-bleeding sap under simulated rainfall conditions. **Soil & Tillage Research**, v. 175, n. September 2017, p. 101–111, 2018a.

JIA, Q. et al. Mulch covered ridges affect grain yield of maize through regulating root growth and root-bleeding sap under simulated rainfall conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 175, n. 8, p. 101–111, 2018b.

JIN, K. et al. Wheat root growth responses to horizontal stratification of fertiliser in a water-limited environment. **Plant Soil**, v. 386, p. 77–88, 2015.

KAHLON, M. S.; KHURANA, K. Effect of land management practices on physical properties of soil and water productivity in wheat- maize system of Northwest India. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 15, n. 4, p. 1–13, 2017.

KAUR, G.; ASTHIR, B. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. **Biologia Plantarum**, v. 59, n. 4, p. 609–619, 18 dez. 2015.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation desingn. **Transactions of the ASAE**, v. 17,

n. 4, p. 678–684, 1975.

KHAN, S. H. . et al. Effect of Drought Stress on Tomato cv . Bombino. **Food processing & technology**, v. 6, n. 7, 2015.

KHAPTE, P. S. et al. Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio-biochemical implications. **Scientia Horticulturae**, v. 248, n. 1, p. 256–264, 2019.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. Acclimation and Adaptive Responses of Woody Plants to Environmental Stresses. **The Botanical Review**, v. 68, n. 2, p. 270–334, 2002.

KRON, A. P.; SOUZA, G. M.; RIBEIRO, R. V. Water deficiency at different developmental stages of glycine max can improve drought tolerance. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 43–49, 2008.

KUROMORI, T.; SEO, M.; SHINOZAKI, K. ABA Transport and Plant Water Stress Responses. **Trends in Plant Science**, v. 23, n. 6, p. 513–522, 2018.

LAKE, J. A. et al. A novel root-to-shoot stomatal response to very high CO₂ levels in the soil: electrical, hydraulic and biochemical signalling. **Physiologia Plantarum**, v. 159, n. 4, p. 433–444, 2017.

LANARI, V. et al. Plant and leaf responses to cycles of water stress and re-watering of “Sangiovese” grapevine. **Folia Horticulturae**, v. 30, n. 1, p. 27–38, 2018.

LEAKEY, A. D. B. et al. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2859–2876, 2009.

LEMOS, R.; SANTOS, R. **Manual de descrição e coleta de solo no campo Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. Vol. 3 ed. Campinas-SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1996.

LI, Q. et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 10, p. 1676–1682, 2010.

LIU, F. et al. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling , leaf gas exchange , and water use efficiency. **Journal of**

Experimental Botany, v. 57, n. 14, p. 3727–3735, 2006.

LIU, H. et al. A convenient method for simultaneous quantification of multiple phytohormones and metabolites: Application in study of rice-bacterium interaction. **Plant Methods**, v. 8, n. 1, p. 2, 2012.

MAFAKHERI, A. et al. Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. **Australian journal of crop science**, v. 4, p. 580–585, 2010.

MAN, J. et al. Root growth , soil water variation , and grain yield response of winter wheat to supplemental irrigation. **Plant Production Science**, v. 1008, p. 1–13, 2016.

MANTOVANI, E. C. et al. Yield and water use efficiency for two sweet potato cultivars depending on irrigation depths. **Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 4, p. 602–606, dez. 2013.

MARIJUAN, M. P.; BOSCH, S. M.-. Ecophysiology of invasive plants: Osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v. 18, n. 12, p. 660–666, 2013.

MARRACCINI, P. et al. Differentially expressed genes and proteins upon drought acclimation in tolerant and sensitive genotypes of *Coffea canephora*. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 11, p. 4191–4212, 2012.

MOHAMMADSHIRAZI, F. et al. A multi-year study of tillage and amendment effects on compacted soils. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 533–541, 2017.

MORALES, R. G. F. et al. Caracterização do tomateiro submetido ao déficit hídrico. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 1, p. 9–17, 2015.

MORANDO, R. et al. Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 3, p. 114–129, 2014.

MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; SAFADOUST, A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 173–179, 2009.

MÜLLER, M. et al. Rapid and sensitive hormonal profiling of complex plant samples by liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry. **Plant Methods**, v. 7, n. 1, p. 37, 2011.

MÜLLER, M.; MUNNÉ-BOSCH, S. Rapid and sensitive hormonal profiling of complex plant samples by liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry. **Plant Methods**, v. 7, n. 1, p. 37, 2011.

MÜLLER, T.; RANQUET BOULEAU, C.; PERONA, P. Optimizing drip irrigation for eggplant crops in semi-arid zones using evolving thresholds. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 54–65, 2016.

MUNNS, R. Plant Adaptations to Salt and Water Stress: Differences and Commonalities. **Advances in Botanical Research**, v. 57, p. 1–32, 1 jan. 2011.

NANDA, A. K. et al. Reactive Oxygen Species during Plant-microorganism Early Interactions. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 2, p. 195–204, 1 fev. 2010.

NANKISHORE, A.; FARRELL, A. D. The response of contrasting tomato genotypes to combined heat and drought stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 202, p. 75–82, 2016.

NEIS, L. et al. Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 409–416, 2010.

OHNISHI, S.; MIYOSHI, T.; SHIRAI, S. Low temperature stress at different flower developmental stages affects pollen development, pollination, and pod set in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, n. 1, p. 56–62, 2010.

PATANÈ, C. et al. Physiological screening for drought tolerance in Mediterranean long-storage tomato. **Plant Science**, v. 249, p. 25–34, 2016.

PERDOMO, J. A. et al. Acclimation of biochemical and diffusive components of photosynthesis in rice , wheat , and maize to heat and water deficit: Implications for modeling photosynthesis. v. 7, n. 11, p. 1–16, 2016.

PINTÓ-MARIJUAN, M.; MUNNÉ-BOSCH, S. Ecophysiology of invasive plants: osmotic adjustment and antioxidants. **Trends in Plant Science**, v. 18, n. 12, p. 660–666, 2013.

POSPÍŠILOVÁ, J. et al. Interactions between abscisic acid and cytokinins during water stress and subsequent rehydration. **Biologia Plantarum**, v. 49, n. 4, p. 533–540, 2005.

QUANQI, L. et al. Root growth, available soil water, and water-use efficiency of winter

wheat under different irrigation regimes applied at different growth stages in North China. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 10, p. 1676–1682, 2010.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A Language and environment for statistical computing**. Vienna, **R Foundation for Statistical Computing**, 2014.

RAO, N. K. S.; SHIVASHANKARA, K. S.; LAXMAN, R. H. (EDS.). **Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops**. New Delhi: Springer India, 2016.

RASHID, M. A. et al. Acclimation to higher VPD and temperature minimized negative effects on assimilation and grain yield of wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 248, p. 119–129, 2018.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBCS, 1999.

RODRIGUEZ, D.; SANDRAS, V. O. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 58, n. 287–302, 2007.

SANTANA, M. J. DE; VIEIRA, T. A.; BARRETO, A. C. Efeitos dos níveis de reposição de água no solo 3 na produtividade do tomateiro. **Horticultura Brasileira**, v. 27, p. 1378–1384, 2009.

SCHWARTZ, S. S.; SMITH, B. Restoring hydrologic function in urban landscapes with suburban subsoiling. **Journal of Hydrology**, v. 543, p. 770–781, 2016.

SEBASTIAN, B. et al. Response of grapevine cv. Syrah to irrigation frequency and water distribution pattern in a clay soil. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 269–279, 2015.

SEBASTIAN, B. et al. Effect of irrigation frequency and water distribution pattern on leaf gas exchange of cv. ‘Syrah’ grown on a clay soil at two levels of water availability. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 410–418, 2016a.

SEBASTIAN, B. et al. Effect of irrigation frequency and water distribution pattern on leaf gas exchange of cv. ‘Syrah’ grown on a clay soil at two levels of water availability.

Agricultural Water Management, v. 177, p. 410–418, 2016b.

SHARMA, P. et al. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1–26, 2012.

SHARMA, S. P. et al. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (*Cucumis melo* L.) to deficit subsurface drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 75–85, abr. 2014.

SHOOSHTARIAN, S. et al. Effects of irrigation frequency regimes on morphological and physiological characteristics of six sedum species. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, n. 26, p. 5694–5700, 2011.

SINCLAIR, T. R. et al. Irrigation frequency and amount effect on root extension during sod establishment of warm-season grasses. **HortScience**, v. 46, n. 8, p. 1202–1205, 2011.

SONGSRI, P. et al. Association of stomatal conductance and root distribution with water use efficiency of peanut under different soil water regimes. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, p. 948–955, 2013.

SUBRAMANIAM, G. et al. Type B Heterotrimeric G Protein γ -Subunit Regulates Auxin and ABA Signaling in Tomato. **Plant Physiology**, v. 170, n. 2, p. 1117–1134, 2016.

SUN, J. et al. Inconsistency of mesophyll conductance estimate causes the inconsistency for the estimates of maximum rate of Rubisco carboxylation among the linear, rectangular and non-rectangular hyperbola biochemical models of leaf photosynthesis-A case study of CO₂en. **Plant Science**, v. 226, p. 49–60, 2014.

SZABADOS, L.; SAVOURÉ, A. Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 2, p. 89–97, 1 fev. 2010.

TAIZ, E.; ZEIGER, L. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TANOU, G. et al. Polyamines reprogram oxidative and nitrosative status and the proteome of citrus plants exposed to salinity stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 37, n. 4, p. 864–885, 2014.

TARCHOUN, N.; M'HAMDI, M.; SILVA, J. A. T. Approaches to evaluate the abortion of hot pepper floral structures induced by low night temperature. **European Journal of Horticultural Science**, v. 77, n. 2, p. 78–83, 2012.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Proline accumulation in plants: a review. **Amino Acids**, v. 35, n. 4, p. 753–759, 1 nov. 2008.

VERSLUES, P. E. ABA and cytokinins: challenge and opportunity for plant stress research. **Plant Molecular Biology**, v. 91, n. 6, p. 629–640, 2016.

WEI, Z. et al. Carbon isotope discrimination shows a higher water use efficiency under alternate partial root-zone irrigation of field-grown tomato. **Agricultural Water Management**, v. 165, p. 33–43, 2016.

WEI, Z. et al. Simulation of Stomatal Conductance and Water Use Efficiency of Tomato Leaves Exposed to Different Irrigation Regimes and Air CO₂ Concentrations by a Modified “Ball-Berry” Model. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. April, p. 445, 2018.

WERNER, T. et al. Root-Specific Reduction of Cytokinin Causes Enhanced Root Growth , Drought Tolerance , and Leaf Mineral Enrichment in Arabidopsis and Tobacco. **The Plant Cell**, p. 1–16, 2010.

WHITTAKER, A. et al. Sucrose phosphate synthase activity and the co-ordination of carbon partitioning during sucrose and amino acid accumulation in desiccation-tolerant leaf material of the C₄ resurrection plant *Sporobolus stapfianus* during dehydration. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 13, p. 3775–3787, 2007.

YAMAGUCHI, K. et al. A protective role for the polyamine spermine against drought stress in Arabidopsis. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 352, n. 2, p. 486–490, 2007.

YAN, F.; LI, X.; LIU, F. ABA signaling and stomatal control in tomato plants exposure to progressive soil drying under ambient and elevated atmospheric CO₂ concentration. **Environmental and Experimental Botany**, v. 139, n. 4, p. 99–104, 2017.

YANG, L. et al. Effects of partial root-zone irrigation on physiology, fruit yield and quality and water use efficiency of tomato under different calcium levels. **Agricultural Water**

Management, v. 104, p. 89–94, 2012.

ZHOU, R. et al. Drought stress had a predominant effect over heat stress on three tomato cultivars subjected to combined stress. **BMC Plant Biology**, p. 1–13, 2017.