

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA

A MANIPULAÇÃO DA QUALIDADE DA LUZ ASSOCIADA
À UV-B MELHORA A FOTOSSÍNTESE E OS TEORES DE
RUTINA EM MICROTOMATEIRO CULTIVADO EM
AGRICULTURA VERTICAL

Autor: Iury Henrique Almeida Lima
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva
Coorientadoras: Dra. Fernanda dos Santos Farnese
Dra. Ana Helena Januário

RIO VERDE – GO
maio – 2022

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA

A MANIPULAÇÃO DA QUALIDADE DA LUZ ASSOCIADA
À UV-B MELHORA A FOTOSÍNTESE E OS TEORES DE
RUTINA EM MICROTOMATEIRO CULTIVADO EM
AGRICULTURA VERTICAL

Autor: Iury Henrique Almeida Lima
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva
Coorientadoras: Dra. Fernanda dos Santos Farnese
Dra. Ana Helena Januário

Dissertação apresentada, como parte das exigências
para obtenção do título de MESTRE EM
AGROQUÍMICA, ao Programa de Pós-Graduação em
Agroquímica do Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia
Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração
Agroquímica.

RIO VERDE – GO
maio – 2022

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Lima, Iury Henrique Almeida

LL732m A MANIPULAÇÃO DA QUALIDADE DA LUZ
ASSOCIADO A UV-B MELHORA A FOTOSSÍNTESE
E OS TEORES DE RUTINA EM MICROTOMATEIRO
CULTIVADO EM AGRICULTURA VERTICAL /

Iury Henrique Almeida Lima; orientador Fabiano
Guimarães Silva; coorientadoras Ana Helena Januário,
Fernanda dos Santos Farnese, . -- Rio Verde, 2022.

38 p.

Dissertação (Mestrado em Agroquímica) -- Instituto
Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2022.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-
Documentalista CRB-1 n°2376

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Iury Henrique Almeida Lima

Matrícula:

2020103310310028

Título do trabalho:

A MANIPULAÇÃO DA QUALIDADE DA LUZ ASSOCIADA À UV-B MELHORA A FOTOSSÍNTESE E OS TEORES DE RUTINA EM MICROTOMATEIRO CULTIVADO EM AGRICULTURA VERTICAL

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 25 /08 /2022

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

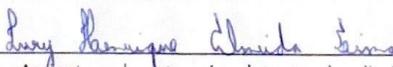
- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

Local

25 /08 /2022

Data



Assinal

Documento assinado digitalmente

autorais

Ciente e de acordo:



FABIANO GUIMARÃES SILVA

Data: 26/08/2022 07:12:20-0300

Verifique em <https://verificador.ifi.br>

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 48/2022 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

A MANIPULAÇÃO DA QUALIDADE DA LUZ ASSOCIADA A UV-B MELHORA A FOTOSSÍNTESE E OS
TEORES DE RUTINA EM MICROTOMATEIRO CULTIVADO EM AGRICULTURA VERTICAL

Autor: Iury Henrique Almeida Lima
Orientador: Fabiano Guimarães Silva

TITULAÇÃO: Mestre em Agroquímica - Área de Concentração Agroquímica

APROVADA em 20 de maio de 2022.

Prof.^a Dr.^a Ana Helena Januário
Avaliadora
externa - Universidade de Franca

Prof.^a Dr.^a Erika Crispim Resende
Avaliadora externa - IF Goiano /
Campus Rio Verde

Prof.^a Dr.^a Fábila Barbosa da Silva
Avaliadora externa - IF Goiano /
Campus Rio Verde

Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva
Presidente da Banca - IF Goiano /
Campus Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- Fabia Barbosa da Silva, 2020202341360019 - Discente, em 12/08/2022 10:52:08.
- Erika Crispim Resende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/05/2022 16:57:54.
- ANA HELENA JANUARIO, ANA HELENA JANUARIO - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano (1), em 25/05/2022 14:24:40.
- Fabiano Guimaraes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/05/2022 16:51:09.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/05/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 390799
Código de Autenticação: 660f264c76



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por todas as dádivas concedidas até aqui.

À minha família, especialmente minha mãe Valdiene Almeida Lima, meu pai Roberto Freire de Lima, minha irmã Ionara Grasiella Almeida Lima, minha avó Alice Maria de Moura e minha tia Cláudia Almeida Nogueira de Faria por terem me incentivado desde o começo a fazer o mestrado e me dado força para conseguir vencer todos os obstáculos no decorrer da jornada de estudante/professor.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva, ao qual sou eternamente grato por sempre acreditar em meu trabalho e confiar a mim o desenvolvimento deste trabalho, pelo tempo dedicado quando necessário, pelo apoio tanto na aquisição do material necessário, quanto na realização das análises, além de todo o conhecimento compartilhado durante esta trajetória.

Às minhas coorientadoras Fernanda dos Santos Farnese e Ana Helena Januário, que contribuíram para a realização deste trabalho, dando sugestões para buscar sempre melhorias nas áreas de fisiologia vegetal e de química, respectivamente.

À professora Dr. Érika Crispim Resende, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Iporá, que foi extremamente solícita em me atender e compartilhar um grande e excelente conhecimento para a realização das análises feitas em HPLC, mesmo em período de férias.

Aos professores Dr. Márcio Rosa e Fábria Barbosa da Silva, que também contribuíram grandemente com seus conhecimentos sobre fisiologia vegetal e colaboraram na implantação do experimento e tratamento dos dados fisiológicos.

A todos os meus colegas do Complexo de Laboratório em que desenvolvi meu trabalho e aos colegas com os quais cursei as disciplinas, com quem pude

compartilhar aprendizados para uma vida inteira, permitindo momentos que levarei em minha memória.

Aos excelentes professores que tive em todas as disciplinas cursadas durante o Mestrado, que contribuíram grandemente para minha formação e principalmente permitiram a integração do conhecimento com a prática.

À empresa Audax Electronics, pela parceria com o projeto desenvolvido, onde foram adquiridas as lâmpadas LEDs utilizadas neste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade de ter sido aluno do mestrado em Agroquímica e pelo fornecimento da estrutura para a realização deste trabalho.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Iury Henrique Almeida Lima, nascido em Itumbiara – GO em 15 de maio de 1992, residente em Inaciolândia – GO, filho de Valdiene Almeida Lima e Roberto Freire de Lima.

Ingressou na graduação em engenharia química em 2009, na Universidade de Uberaba – UNIUBE, onde foi monitor de Química Analítica por dois semestres.

Em 2014, fez intercâmbio na Austrália (Melbourne) por dois meses para vivenciar a experiência de estudar inglês.

Em 2015, foi contratado como professor de Ciências da Natureza e Matemática pelo Colégio Estadual Perilo Rodrigues de Moura (Inaciolândia – GO), tendo sido efetivo em razão de aprovação em concurso no ano de 2020.

Em 2020, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Fabiano Guimarães Silva.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAIS E MÉTODOS	4
2.1 Material vegetal e condições de crescimento	4
2.1. Condições de crescimento	5
2.2. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a	6
2.3. Determinação da fotorrespiração	6
2.4. Pigmentos cloroplastídicos	7
2.5. Análise do perfil cromatográfico de compostos fenólicos em amostras de tomate.....	7
2.6. Análise estatística.....	9
3. RESULTADOS.....	9
3.1. Desempenho fotossintético em microtomateiro sob diferentes qualidades espectrais da luz e radiação UV-B.....	9
3.2. Determinação da respiração, fotorrespiração e pigmentos cloroplastídicos em microtomateiro sob diferentes qualidades espectrais da luz e radiação UV-B	13
3.3. Luz monocromática azul e radiação UV-B melhoram os níveis de rutina nos frutos de microtomateiro	15
3.4. Ácido clorogênico	20
4. DISCUSSÃO.....	22
4.1. Efeitos dos tratamentos na fisiologia das plantas	22
4.2. Efeitos dos tratamentos no acúmulo de metabólitos secundários.....	24
5. REFERÊNCIAS.....	27

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de rutina encontrada nas amostras (mg.kg^{-1}) de tomate submetidas a seis tratamentos de luz em diferentes estágios de coleta. Legenda da codificação das amostras: “Luz-Estágio”: Luzes: W: Luz branca; B: Luz azul; R: Luz vermelha; UV: Luz Ultravioleta; Estágios: G: Estágio verde; O: Estágio laranja; R: Estágio vermelho. DP: Desvio padrão e DPR: Desvio padrão relativo das injeções das amostras.....	16
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), taxa transpiratória (E), concentração interna de CO_2 (C_i) e eficiência extrínseca do uso da água (A/E) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz associados ou não à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha. 11
- Figura 2.** Taxa de transporte de elétrons (ETR) e razão entre taxa de transporte de elétrons e taxa fotossintética (ETR/A) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha..... 11
- Figura 3.** Parâmetros de fluorescência da clorofila a: rendimento quântico efetivo do fotossistema II (YII), rendimento quântico não regulado da dissipação não fotoquímica do fotossistema II (YNO) e coeficiente de extinção não fotoquímica da fluorescência (NPQ) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha. 12

Figura 4. Taxa respiratória e razão entre taxa respiratória e taxa fotossintética em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha..... 13

Figura 5. Fotorrespiração em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha. 14

Figura 6. Pigmentos cloroplastídicos (clorofila a, b e total) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha. 14

Figura 7. Quantidade de rutina encontrada nas amostras (mg.kg^{-1}) de tomate submetidas a seis tratamentos de luz [Luz branca (W), Luz branca + Luz Ultravioleta (WUV), Luz azul (B), Luz azul + Luz Ultravioleta (BUV), Luz vermelha (R) e Luz vermelha + Luz Ultravioleta (RUV)]em diferentes estágios de coleta: tomate verde (G), tomate laranja (O) e tomate vermelho (R). Legenda da codificação das amostras: “Luz-Estágio”: Luzes: W: Luz branca; B: Luz azul; R: Luz vermelha; UV: Luz Ultravioleta; Estágios: G: Estágio verde; O: Estágio laranja; R: Estágio vermelho. 15

Figura 8. Gráfico de superfície de resposta para a quantidade de rutina (mg/kg) em função dos estágios de coleta das amostras de tomate e dos tratamentos de luz combinados com radiação Ultravioleta. Tratamento dos dados feito no StatSoft, Inc. (2014). STATISTICA (data analysis software system), version 12. www.statsoft.com.19

Figura 9. Gráfico de superfície de resposta para a quantidade de rutina (mg/kg) em função dos estágios de coleta das amostras de tomate e dos tratamentos de luz. Tratamento dos dados feito no StatSoft, Inc. (2014). STATISTICA (data analysis software system), version 12. www.statsoft.com.....20

Figura 10. Espectrograma na faixa do ultravioleta para o pico presente no tempo de 15,65 min (ácido clorogênico).21

Figura 11. Áreas médias dos picos de ácido clorogênico encontradas para massa de 0,1 g de amostras de tomate submetidas a seis tratamentos de luz [Luz branca (W), Luz branca + Luz Ultravioleta (WUV), Luz azul (B), Luz azul + Luz Ultravioleta (BUV), Luz vermelha (R) e Luz vermelha + Luz Ultravioleta (RUV)] em diferentes estágios de coleta: tomate verde (G), tomate laranja (O) e tomate vermelho (R). Legenda da codificação das amostras: “Luz-Estágio”: Luzes: W: Luz branca; B: Luz azul; R: Luz vermelha; UV: Luz Ultravioleta; Estágios: G: Estágio verde; O: Estágio laranja; R: Estágio vermelho.....21

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACIONES E UNIDADES

$\mu\text{g.mL}^{-1}$ - micrograma por mililitros

μL - microlitros

μm – micrômetros

$\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ – micromol de dióxido de carbono por metro quadrado por segundo

$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ – micromol por metro quadrado por segundo

BUV - azul + ultravioleta B

cm^3 – centímetros cúbicos

DP – Desvio Padrão

DPR – Desvio Padrão Relativo

ETR – Taxa de Transporte de Elétons

g – grama

gs – condutância estomática

HPLC – High Performance Liquid Chromatograph

LEDs – Diodos Emissores de Luz

m – metro

mg.kg^{-1} – miligrama por quilograma

mL - mililitro

mL.min⁻¹ – mililitros por minuto

mm – milímetros

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

mol H₂O.m⁻².s⁻¹ – mol de água por metro quadrado por segundo

NPQ – coeficiente de extinção não fotoquímica da fluorescência

°C – graus Celsius

PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa

r – coeficiente de correlação

R² – coeficiente de determinação

RDC – resolução da diretoria colegiada

RUV – vermelho + ultravioleta B

UV – Ultravioleta

UV-A – Ultravioleta A

UV-B – Ultravioleta B

UVR8 – Fotorreceptor UV Resistance Locus 8

W.m⁻² – Watts por metro quadrado

WUV – branco + ultravioleta B

YNO – rendimento quântico não regulado da dissipação não fotoquímica do fotossistema II

μmol.mol⁻¹ – micromol por mol

A manipulação da qualidade da luz associada à UV-B melhora a fotossíntese e os teores de rutina em microtomateiro cultivado em Agricultura Vertical
(Normas de acordo com a revista *Frontiers in Plant Science*)

RESUMO

A agricultura vertical urbana com sistema de iluminação pode ser uma alternativa de infraestrutura verde para aumentar a produção local de alimentos independentemente das condições ambientais e solo. Nesse sistema, o controle da qualidade da luz pode melhorar o desempenho fisiológico de plantas, além de estar associado à indução de vias metabólicas que contribuem para a produção de compostos fenólicos importantes para a saúde humana. Sendo assim, objetivou-se nesse estudo avaliar a influência de comprimentos de ondas brancos e monocromáticos (vermelho e azul) associados ao UV-B no desempenho fotossintético e na produção de compostos fenólicos em frutos de microtomateiros cultivados em agricultura vertical. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, sendo seis qualidades de luz (branca, branca + UV, azul, azul + UV, vermelha e vermelha + UV) com intensidade luminosa de $300 \mu\text{mol.m}^{-2} \text{s}^{-1}$, um fotoperíodo de 12 h e aplicação de radiação UV-B por 1 h diária, com uma intensidade média de $3,7 \text{ W.m}^{-2}$, tendo sido adotadas seis repetições por tratamento para as avaliações fisiológicas. Vinte e seis dias após a implantação dos tratamentos, foram feitas as avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, respiração noturna e fotorrespiração. Frutos nos estágios de maturação (verde, laranja e vermelho) foram coletados para identificação e quantificação dos compostos fenólicos (ácido clorogênico e rutina) para melhorar o desempenho fisiológico e metabólico de microtomateiros utilizando diferentes qualidades de luz. O estudo identificou que as plantas sob luz azul + UV apresentaram maiores taxas fotossintéticas ($A = 11,57 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e, nos frutos, em todos estágios de maturação, houve maior quantidade de rutina, tanto nas plantas sob luz azul, quanto azul + UV. Enquanto isso, sob condição de luz vermelha, a eficiência fotossintética (redução nas variáveis *A*, *gs*, *YII* e *ETR*) foi afetada, tendo sido necessária a ativação de mecanismos supressores como observado em razão dos maiores valores de respiração noturna e *YNO*. Esses resultados destacam a importância da seleção de faixas espectrais da luz no cultivo de hortifrutis para a produção de frutos com maior quantidade de metabólitos secundários e que podem atuar como compostos de cor, sabor e na promoção da saúde, fato de especial interesse para os produtores em sistemas de cultivo sustentáveis.

Palavras-chave: Micro-Tom, LEDs, flavonoides, rutina, agricultura vertical

Light quality manipulation associated with UV-B improves photosynthesis and rutin levels in microtomato plants cultivated in Vertical Agriculture

(Standards according to the journal *Frontiers in Plant Science*)

ABSTRACT

Urban vertical agriculture with lighting system can be a green infrastructure alternative to increase local food production regardless of environmental and soil conditions. In this system, light quality control can improve the plant physiological performance, in addition to being associated with the induction of metabolic pathways that contribute to the phenolic compound production important to human health. Therefore, this study aimed to evaluate the influence of white and monochromatic (red and blue) wavelengths associated with UV-B on photosynthetic performance and production on phenolic compounds in microtomato fruits cultivated in vertical agriculture. The experimental design adopted was completely randomized, with six light qualities (white, white + UV, blue, blue + UV, red, and red + UV), light intensity of $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, a photoperiod of 12 h, and application of UV-B radiation for 1 h daily, and an average intensity of $3.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, being adopted six replicates per treatment for the physiological evaluations. Twenty-six days after the treatment installation, evaluations of gas exchange, chlorophyll *a* fluorescence, nocturnal breathing, and photorespiration were carried out. Fruits in the ripening stages (green, orange, and red) were collected for identification and quantification of the phenolic compounds (chlorogenic acid and rutin) to improve the physiological and metabolic performance of microtomato plants with different light qualities. This study identified that plants under blue light + UV showed higher photosynthetic rates ($A=11.57 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and a higher amount of rutin in fruits at all maturation stages, both in plants under blue light and under blue + UV. Meanwhile, photosynthetic efficiency [reduction in photosynthetic rate (*A*), stomatal conductance (g_s), effective quantum yield of photosystem II (*YII*), and Electron Transport Rate (*ETR*) variables] was affected under red light condition, requiring the activation of suppressive mechanisms as found, in reason of the highest values of nocturnal respiration and unregulated quantum yield of the non-photochemical dissipation of the photosystem II (*YNO*). These results highlight the importance to select light spectral bands in the vegetable cultivation to produce fruits with a greater amount of secondary metabolites and that can act as compounds of color, flavor, and health promotion, special interest fact to producers in sustainable cropping systems.

Keywords: Flavonoids. LEDs. Micro-Tom. Rutin. Vertical farming.

1. INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo compostos bioativos têm ganho destaque nas últimas décadas devido a seus diversos benefícios como redução na incidência de câncer, doenças cardiovasculares e doenças inflamatórias. Os metabólitos secundários das plantas são definidos como compostos presentes em algumas espécies, que apresentam benefícios tanto para a sobrevivência quanto para sua reprodução em diferentes ambientes. Estas moléculas derivam do metabolismo primário e estima-se que as plantas sejam capazes de sintetizar mais de 200.000 tipos de compostos diferentes. Os compostos fenólicos, especialmente os ácidos fenólicos e os flavonoides, são uma classe de compostos de interesse, tendo em vista sua alta capacidade antioxidante, que permite a modulação e/ou a redução de estresses oxidativos. No entanto, para usufruir de tantos benefícios, é necessário o consumo de alimentos que apresentem altos teores destes compostos. Esta gama de aplicações tem despertado o interesse em manipular a produção destes metabólitos (Ribeiro et al., 2019; Shih e Morgan, 2020). Elicitores têm se mostrado uma estratégia promissora para promover aumento na produção de compostos bioativos. Entre os principais elicitores abióticos, destaca-se a utilização de compostos inorgânicos, como sais e fatores físicos. A luz é um dos mais estudados, dessa forma existe uma grande quantidade de informações disponíveis para diferentes espécies de plantas cultivadas sob diferentes comprimentos de onda (Liu *et al.*, 2019).

O uso da radiação ultravioleta também é um importante indutor na síntese de compostos bioativos, levando em consideração que este tipo de radiação induz a síntese de flavonoides e compostos fenólicos, moléculas que funcionam tanto como antioxidantes, quanto como defesa para as plantas (Neugart and Schreiner, 2018). A manipulação de doses de radiação UV-B pode ser feita para controlar os resultados na produção de metabólitos secundários e no desempenho das plantas, por exemplo: as plantas podem inicialmente ser cultivadas sob condições ótimas, até atingir um determinado grau de desenvolvimento e posteriormente ser submetidas ao tratamento com UV-B, objetivando a produção dos compostos de interesse, dessa forma, os impactos morfológicos deste tipo de radiação podem ser reduzidos (Mosadegh *et al.*, 2018).

A luz, além de ser um fator chave na regulação do crescimento e desenvolvimento, também age como um sinal ambiental que desencadeia a produção de moléculas específicas em resposta ao ambiente e ao estágio de desenvolvimento vegetal

(Silva *et al.*, 2020). A percepção de diferentes comprimentos de onda da luz acontece pela ação de diversos fotorreceptores, como os fitocromos (que absorvem na região do vermelho e do vermelho-distante), os criptocromos e fototropinas (que absorvem na região do azul e do UV-A) e o UVR8 (que absorve a luz UV-B) (Wang *et al.*, 2020). A luz é um dos fatores que afetam fortemente a biossíntese e o acúmulo de diversos metabólitos secundários nas plantas. Essa capacidade está relacionada tanto ao aumento na fotossíntese, que gera mais esqueletos de carbono para o metabolismo vegetal, incluindo o metabolismo secundário, quanto à ação dos fotorreceptores, que são capazes de perceber os fótons e disparar vias de sinalização, que, por sua vez, levam a mudanças na expressão dos genes. Assim, tanto o crescimento quanto a produção de compostos específicos de interesse podem ser estimulados pela modulação das condições luminosas (Silva *et al.*, 2020; Thoma *et al.*, 2020).

A fotossíntese é o único processo biológico que permite a conversão de energia luminosa em energia química, sendo responsável por sustentar a vida na Terra e manter quase todos os demais processos fisiológicos vegetais. No entanto, nem toda energia proveniente do Sol é aproveitada, uma vez que 30% é refletida pela superfície terrestre, 19% é absorvida pelas nuvens, o que deixa disponível apenas uma fração para os organismos fotossintetizantes. Associado a isso, a eficiência do processo fotossintético é limitada. Para plantas C3, por exemplo, a eficiência máxima teórica é de 4,6%, enquanto para as C4 é de 6%, já que cerca de 51,3% da luz recebida está fora do espectro da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), 4,9% é refletida ou transmitida e 6,6% é perdida por ineficiência fotoquímica do próprio processo (Landi *et al.*, 2020).

Para contornar as questões principalmente relacionadas à luz, ambientes de cultivo controlado têm ganhado atenção, pois as possibilidades de controlar cada vez mais fatores têm se tornado uma realidade. Desta forma, diodos emissores de luz (LEDs) podem ser empregados, visto que, além de apresentarem uma banda estreita e específica de emissão, apresentam maior eficiência na conversão de energia elétrica em energia luminosa (em comparação com outros tipos de lâmpadas) (ZOU *et al.*, 2020). O uso para o cultivo de plantas e a quantidade de estudos mostrando os comprimentos de ondas mais adequados têm crescido (Thwe *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015, 2018; Ko *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016, 2018; Taulavuori *et al.*, 2016, 2018; Nam, Kim and Eom, 2018). Ademais, este tipo de cultivo em ambiente protegido tem sido proposto para contornar os efeitos do cenário de mudanças climáticas que têm sido enfrentados e que

devem se agravar nas próximas décadas, levando em consideração que a frequência de desastres naturais como secas e tempestades tem aumentado (Fang *et al.*, 2020).

Associado a isso, os LEDs apresentam algumas vantagens, incluindo maior vida útil, tamanho reduzido, menor emissão de calor e menor consumo energético. Um diferencial do uso de LEDs está no fato de que é possível, com base nos resultados dos estudos, desenvolver luzes específicas para cada espécie, o que permite a obtenção de sistemas com qualidades e proporções ótimas de operação, que, por sua vez, otimizam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Bian *et al.*, 2018). Este tipo de iluminação é indicado para a utilização em fazendas verticais. Este tipo de cultivo apresenta uma alta densidade produtiva (em sistemas de multicamadas), além de produzir vegetais de alto valor nutritivo. As fazendas verticais têm sido adotadas especialmente em locais que apresentam limitações ambientais e territoriais (como Ásia e Europa) para produção de alimentos, além de contribuírem para o contexto de segurança alimentar (Gómez and Izzo, 2018).

Entre as muitas culturas que podem ser favorecidas com o cultivo em ambiente controlado com o uso de LEDs, destaca-se o tomate. O tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é um dos vegetais mais consumidos ao redor do mundo, apresentando uma produção que ultrapassa 180 milhões de toneladas. O cultivo se tornou altamente efetivo devido ao desenvolvimento de novas variedades provenientes de programas de cruzamentos iniciados no século XX e à introdução de tecnologias avançadas de cultivo (Mata-Nicolás *et al.*, 2020). O principal desafio enfrentado pela agricultura nos últimos 20 anos tem sido a produção de alimentos suficientes e nutritivos para uma população crescente, ao mesmo tempo em que se busca cumprir os requisitos de cultivo sustentável, reduzindo, assim, os impactos ambientais (Ronga *et al.*, 2020).

Os frutos do tomate são ricos em licopeno, compostos fenólicos, ácidos orgânicos, vitaminas e muitos outros compostos benéficos para a saúde (Lu *et al.*, 2019). O conteúdo nutricional do tomate pode ser manipulado pelo uso de elicitores, sendo a luz o fator mais utilizado para tal finalidade, podendo estar associada ou não a outros fatores. O uso de LEDs suplementares no cultivo do tomate já demonstrou aumento no teor de glicose, frutose e sacarose no pericarpo dos frutos (Fanwoua *et al.*, 2019), a luz azul favoreceu aumento no conteúdo de ácido ascórbico em tomates cultivados *in vitro* (Zushi, Suehara and Shirai, 2020). Diferentes culturas são afetadas de forma diferente em relação à produção de metabólitos secundários quando submetidas aos mais diversos comprimentos de onda, como observado no aumento do conteúdo de

compostos fenólicos totais e de flavonoides em microverdes de soja cultivada sob LEDs azul e UV-A (Zhang *et al.*, 2019), no maior acúmulo de compostos fenólicos em brotos de canola cultivados sob LED azul (Park *et al.*, 2019) e no maior conteúdo de flavonoides em manjeriço verde quanto cultivado sob luz vermelha + azul na proporção 1:1, e na proporção 1:3 para manjeriço vermelho (Chutimanukul *et al.*, 2022).

A rutina é um glicosídeo flavonoide, também conhecida como vitamina P, sendo produzida pelo metabolismo secundário de diversas plantas. É uma molécula natural de grande interesse em razão das suas atividades farmacológicas, podendo ser empregada para o tratamento de varizes, hemorragias internas e hemorroidas. Além disso, este metabólito apresenta atividade antioxidante, anti-inflamatória, antidiabética e cardioprotetora (Semwal *et al.*, 2021).

Apesar de ser encontrada em muitas espécies, um número limitado de plantas são reconhecidamente grandes fontes de rutina (Kianersi *et al.*, 2020). Sua concentração é aumentada quando as plantas são expostas à luz UV-B, o que reforça seu papel protetor contra este tipo de radiação (Chua, 2013). Dessa forma, é de grande importância investigar formas de aumentar a produção de compostos de interesse, como é o caso da rutina, visando à produção de alimentos nutracêuticos que contribuirão para a saúde humana.

Diante desse cenário, nossa hipótese é que *i*) as diferentes qualidades de luz promovem respostas contrastantes na produção de metabólitos secundários como a rutina, *ii*) o uso associado de luz ultravioleta B (UV-B) pode aprimorar a produção desses compostos por gerar um maior estresse nas plantas e *iii*) o emprego de diferentes qualidades de luz e UV-B promove diferentes respostas fisiológicas nas plantas. Assim, objetivou-se nesse estudo avaliar a influência de comprimentos de ondas brancos e monocromáticos (vermelho e azul), associados ao UV-B, no desempenho fotossintético e na produção de compostos fenólicos em frutos de microtomateiros cultivados em agricultura vertical.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material vegetal e condições de crescimento

O experimento foi conduzido no Complexo de Laboratórios de Biotecnologia Vegetal do Instituto Federal Goiano/Campus Rio Verde (17°48'10.9"S, 50°54'21.8"W,

755m altitude). Inicialmente, em casa de vegetação climatizada, com umidade relativa de ~65% e temperatura ~25°C, sementes de microtomateiros, cultivar Micro-Tom (MT) tipo selvagem (MTwt), foram semeadas em bandejas contendo substrato Bioplant Plus® (BioPlant Agrícola Ltda, Nova Ponte, MG, Brasil) e, após 15 dias de germinação, foram transplantadas para vasos (350 cm³) contendo o mesmo substrato, suplementado com 0,5 g 4:14:8 NPK, onde permaneceram até os 39 dias. As plantas foram cultivadas em casa de vegetação sob condições controladas de irradiância, temperatura (~25°C) e umidade relativa (~60%), no Complexo de Laboratórios de Biotecnologia Vegetal do Instituto Federal Goiano/Campus Rio Verde (17°48'10.9"S, 50°54'21.8"W, 755m altitude)

2.1. Condições de crescimento

Plantas com 39 dias de idade (início da frutificação) foram transferidas para o sistema de Agricultura vertical (indoor), com umidade relativa de 50% ± 5 e temperatura controlada 25°C ± 2 para verificar o efeito dos manejos de luz sobre as plantas e os frutos. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, sendo seis qualidades (luz branca, azul, vermelha, branca + UV, azul + UV e vermelha + UV) com 6 repetições. A intensidade luminosa foi utilizando o software Inventronics Multi-Programmer (Inventronics, Oklahoma, USA) de forma a padronizar uma intensidade luminosa de 300 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ em todos os tratamentos. O fotoperíodo foi de 12h e a aplicação de luz UV ocorreu diariamente no período de 11:00 a 12:00 horas, sob intensidade média de 3,7 W.m^{-2} .

Para a implantação dos tratamentos de qualidade de luz, dentro do ambiente de crescimento foram montadas cabines isoladas com diodos emissores de luz (LEDs) com dimensões de 1,00m x 0,75m, comprimento e largura, respectivamente, com altura ajustável. Cada cabine foi separada por uma placa de poliestireno expandido (Isopor®). As plantas foram expostas às seguintes condições: *i*) Controle (Luz branca e Luz branca + UV-B); e *ii*) Luz azul, luz azul + UV-B, luz vermelha e luz vermelha + UV-B. As plantas ficaram expostas aos tratamentos por 40 dias, tendo aos 26 dias após exposição sido feitas as avaliações fisiológicas nas folhas, considerando que a maioria dos frutos apresentava pleno enchimento. Os frutos foram coletados na mesma época em cada condição de cultivo, conforme sua maturação, de acordo com as colorações frutos verdes, laranja e vermelho para a avaliação dos metabólitos secundários.

2.2. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas para registro da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), transpiratória (E , $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i) e da taxa de respiração noturna (R_n , $\mu\text{mol CO}_2.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). A partir desses dados, foi possível calcular a eficiência do uso da água ($\text{EUA} = A/E$). As medições foram feitas utilizando medidor portátil de trocas gasosas LI-6800 XT (Li-Cor Inc., Nebraska, USA), entre 08:00 e 11:00h em uma folha completamente expandida com temperatura ajustada em $25\text{ }^\circ\text{C}$, radiação fotossinteticamente ativa artificial (RFA) de $1000\ \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, concentração atmosférica de CO_2 (C_a) $\sim 400\ \mu\text{mol.mol}^{-1}$ e umidade relativa de $\sim 65\%$.

As variáveis de fluorescência da clorofila *a* foram avaliadas utilizando o IRGA (analisador de gás por infravermelho), na mesma folha em que foram feitas as medições de trocas gasosas. Foram obtidas as variáveis de fluorescência: rendimento quântico efetivo de conversão fotoquímica de energia no FSII, $\text{YII} = (\text{Fm}' - \text{F})/\text{Fm}'$. Os rendimentos quânticos da dissipação de energia regulada, $\text{YNPQ} = (\text{F}/\text{Fm}') - (\text{F}/\text{Fm})$, e da dissipação de energia não regulada, $\text{YNO} = \text{F}/\text{Fm}$ foram calculados de acordo com Genty et al. (1989) e Hendrickson et al. (2004). O $\Delta\text{F}/\text{Fm}'$ foi utilizado ainda para estimar a taxa aparente de transporte de elétrons, $\text{ETR} = \Delta\text{F}/\text{Fm}' \text{ PAR} \cdot \text{Leaf}_{\text{ABS}} \cdot 0,5$ (Bilger et al., 1995), em que PAR é a densidade de fluxo de fótons ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) incidente sobre a folha; Leaf_{ABS} correspondente à fração de luz incidente que é absorvida pelas folhas, e 0,5, à fração de energia de excitação distribuída para o FSII (Laisk e Loreto, 1996). A razão entre a taxa de aparente de transporte de elétrons e assimilação de CO_2 (ETR/A) foi calculada para estimar o uso de elétrons em outros processos não relacionados à fotossíntese (Ribeiro et al., 2009).

2.3. Determinação da fotorrespiração

A fotorrespiração foi obtida a partir dos dados de trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*, de acordo com Epron et al. (1995) e Valentini et al. (1995). Para os cálculos, assumiu-se que o fluxo de elétrons linear é levado à carboxilação e à oxigenação da ribulose-1,5-bifosfato (ou seja, todos os outros processos consumindo os elétrons de luz dirigido são desprezíveis), sendo necessários quatro elétrons para cada ciclo de carboxilação ou oxigenação e uma molécula de CO_2 é lançada a cada dois ciclos de oxigenação por descarboxilação da glicina na fotorrespiração. Assim:

$$J_t = (F_m' - F_s) / F_m' \cdot PAR \cdot 0,454$$

$$J_c = 1/3 [J_t + 8 (A + R_l)]$$

$$J_o = 2/3 [J_t - 4 (A + R_l)]$$

$$Rp = [J_t - 4 (A + R_l)] / 12$$

Em que J_t é a taxa total de transporte de elétrons através do FSII da fotossíntese e fotorrespiração; $(F_m' - F_s) / F_m'$ é o rendimento quântico efetivo do fluxo linear de elétrons pelo FSII; PAR é o fluxo de fótons ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) incidente sobre a folha; 0,454 representa a proporção de quanto foi utilizado pelos centros de reação do FSII (Melis et al., 1987), respectivamente; J_c e J_o são os elétrons atribuídos às reações de carboxilação e oxigenase da RuBP, respectivamente; A é a taxa de assimilação líquida de CO_2 ; Rp é a taxa de produção de CO_2 em fotorrespiração; e R_l é a taxa de respiração mitocondrial durante o dia, estimada de acordo com Bai et al. (2008), usando a respiração noturna (R_n). R_l foi estimada em diferentes temperaturas usando o $Q_{10} = 2,2$ (Larcher, 1983) sendo $R_l = R_n Q_{10}^{(T_d - T_n)/10}$, em que T_n é a temperatura foliar na qual a R_d foi medida e T_d é a temperatura foliar na qual a R_l foi calculada.

2.4. Pigmentos cloroplásticos

Os teores de clorofila a , b e totais foram obtidos utilizando o clorofilômetro CLOROFILOG (CFL, Falker 1030, Porto Alegre, Brasil) em uma folha totalmente expandida, tendo sido feitas três leituras na folha, já descartando quaisquer valores muito discrepantes durante as medições.

2.5. Análise do perfil cromatográfico de compostos fenólicos em amostras de tomate

2.5.1. Condições cromatográficas

A análise cromatográfica foi feita no Cromatógrafo líquido de alta eficiência, Shimadzu[®], com detector fotodiodo modelo SPD-M20A e coluna analítica Zorbax Eclipse Plus C₁₈ (250 mm x 4,6 mm, 5 μm ; Agilent[®]), acoplada à pré-coluna Zorbax Eclipse Plus C₁₈ (12,5 x 4,6 mm, 5 μm , Agilent[®]). As condições cromatográficas foram: volume de injeção de 10 μL , temperatura do forno de 30°C, varredura na faixa de 200 a 400 nm e leituras monitoradas nos comprimentos de onda de 254 nm. A fase móvel foi eluída em fluxo de 1,0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, tendo a fase A sido composta por ácido acético 0,1%

grau UV/HPLC/espectroscópico (Proquimios[®]) e fase móvel B metanol por grau HPLC (J.T. Baker[®]). O programa foi ajustado a um gradiente de eluição da fase móvel B crescente de 10 a 66% em 32 minutos, decrescente de 66 a 10% de 32 a 35 minutos e isocrático em 10% por 5 minutos, com tempo total de corrida de 40 minutos. A fase móvel constituída por água acidificada foi filtrada em sistema de filtração de fase móvel (Restek) a vácuo com membrana filtrante de celulose (47 mm x 0,45µm, Whatman[®]). O metanol grau HPLC (J.T. Baker[®]) foi filtrado com membrana PTFE (Politetrafluoroetileno) (47 mm x 0,45µm, Whatman[®]).

2.5.2. Curvas de calibração

Padrões de ácido gálico, rutina e quercetina foram diluídos em metanol grau HPLC (J.T. Baker[®]). Foram preparadas soluções dos padrões para construção das curvas de calibração pela diluição seriada nas seguintes concentrações: 100; 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125 µg.mL⁻¹ em metanol grau HPLC (J.T. Baker[®]). As soluções resultantes foram injetadas em triplicata no cromatógrafo. As curvas de calibração foram construídas por meio de plotagem das áreas dos picos cromatográficos dos padrões *versus* concentrações em programa Microsoft[®] Excel[®] para Microsoft 365 versão 2010 para Windows[®]. A linearidade foi verificada pelo coeficiente de determinação (R²) e pelo coeficiente de correlação (r), cujos valores, segundo a RDC n° 166/2017 (BRASIL, 2017), devem estar acima de 0,99, com desvios padrão relativos (DPRs) menores que 5%. As equações resultantes para cada curva foram estimadas pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

2.5.3. Preparo das amostras

Os extratos metanólicos foram preparados utilizando cerca de 0,1 g de massa seca de tomate liofilizado com 2 mL de metanol-HPLC (J.T. Baker[®]) em banho ultrassônico (Saners Medical, Sonic Clean 2PS) por 30 minutos. O sobrenadante foi transferido com auxílio de micropipeta para seringa de 3,0 mL. Foi feita a filtração direta para *vial* por meio de seringa contendo unidade filtrante de Nylon de 13 mm de diâmetro e 0,45 µm de diâmetro de poro (Analítica[®]). Foram injetados, em duplicata, volumes de 10 µL dos extratos das amostras no cromatógrafo líquido de alta eficiência. A detecção dos compostos presentes nas amostras foi feita por comparação com os tempos de retenção dos picos de padrões e dos espectros resultantes. A quantificação

dos compostos foi feita através das áreas dos picos e das equações obtidas das curvas de calibração.

2.6. Análise estatística

Os dados fisiológicos foram submetidos a um teste de Shapiro-Wilk para verificar se apresentavam distribuição normal. A análise estatística foi feita com o software Sisvar e os dados obtidos, submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo as diferenças entre as médias testadas pelo teste de Tukey a um nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Os gráficos foram obtidos utilizando o software SigmaPlot 12.0. Os dados cromatográficos foram avaliados por análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos, comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). Os resultados das variáveis dependentes também foram tratados por análise de regressão múltipla da metodologia de superfície de resposta. Além disso, para visualizar o efeito das variáveis independentes nas respostas avaliadas, foram construídos gráficos de superfície de resposta para avaliação dos efeitos sobre as amostras analisadas. Toda análise estatística foi feita com o auxílio do programa StatSoft, Inc. (2014). STATISTICA (*Data Analysis Software System, version 12*) e do programa Microsoft® Excel® para Microsoft 365 versão 2010 para Windows®.

3. RESULTADOS

O ciclo de vida do Micro-Tom é acelerado em comparação com o tomate convencional, tendo em vista que, aos 39 dias, os frutos estavam em início de desenvolvimento e aos 65 dias muitos frutos já se encontravam desenvolvidos, iniciando a maturação. A morte das plantas no tratamento de luz vermelha, associada ao UV-B, não permitiu a avaliação de suas características fisiológicas.

3.1. Desempenho fotossintético em microtomateiro sob diferentes qualidades espectrais da luz e radiação UV-B

As trocas gasosas foram afetadas diferentemente de acordo com a qualidade de luz a que o Micro-Tom foi exposto. A luz azul + UV-B promoveu maiores valores de taxa fotossintética, quando comparada às demais qualidades de luz. Em contrapartida, menores valores de condutância estomática (g_s), taxa transpiratória e concentração interna de CO_2 (C_i) foram observados nas plantas cultivadas sob luz branca + UV-B. A luz azul e a luz azul + UV-B promoveram ainda menores valores de eficiência

instantânea no uso da água (A/E). A condutância estomática (g_s) foi maior em plantas crescidas sob luz azul associada ao UV-B, enquanto as plantas do tratamento de luz branca, associado à UV-B, apresentaram os menores valores (Figura 1). Este fato está relacionado ao grau de abertura dos estômatos e isto pode ser verificado ao analisar os valores das taxas fotossintéticas (A) e das taxas transpiratórias (E), em que é notado maior valor tanto para a fotossíntese, quanto para a transpiração nas plantas do tratamento azul + UV. Em plantas mantidas sob luz azul, branca e branca + UV, não houve diferença na taxa fotossintética, enquanto para a taxa transpiratória sob luz branca + UV, foram observados os menores valores.

Ao mesmo tempo, quando determinada a eficiência extrínseca (A/E) do uso da água, nota-se que as plantas cultivadas sob luz branca + UV apresentaram maiores eficiências, enquanto tanto as plantas da luz azul, quanto na luz azul + UV apresentaram menores eficiências.

Já para a concentração interna de CO_2 (C_i), não houve diferença significativa entre as qualidades de luz azul e azul + UV, que apresentaram os maiores valores, indicando presença de maior quantidade de CO_2 acumulado na cavidade subestomática, enquanto para a luz branca + UV, foram notados os menores valores de concentração interna de CO_2 (Figura 1).

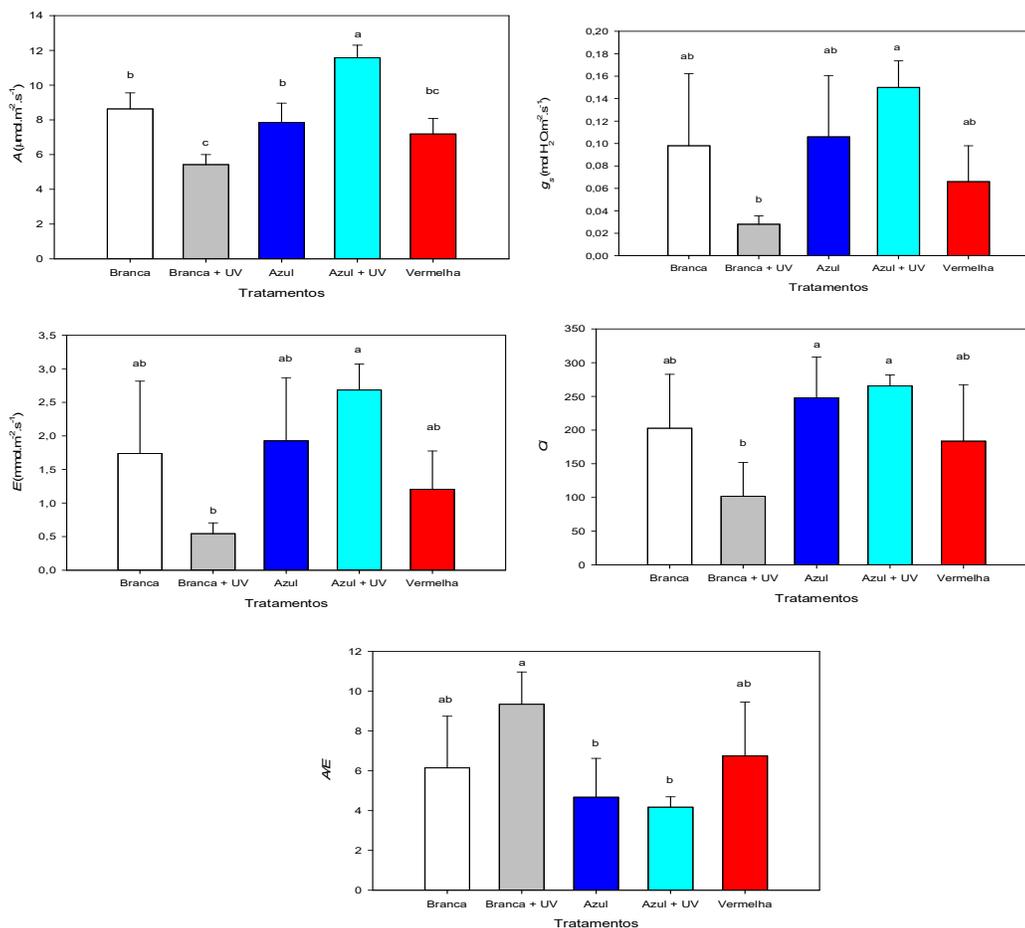


Figura 1. Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), taxa transpiratória (E), concentração interna de CO_2 (C_i) e eficiência extrínseca do uso da água (A/E) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz associados ou não à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha.

A Figura 2 mostra que a taxa de transporte (ETR) foi maior e igual nas plantas cultivadas sob luz branca + UV e azul e menor nas demais condições. Quando analisada a razão entre a taxa de transporte de elétrons e a taxa fotossintética, observa-se que as plantas submetidas à luz branca + UV apresentaram as maiores razões, enquanto para as plantas crescidas em luz azul + UV, são observadas as menores razões.

Ao analisar o rendimento quântico efetivo do fotossistema II (YII) (Figura 3), nota-se que as plantas submetidas às condições de luz branca + UV e azul apresentaram os maiores rendimentos, enquanto as demais qualidades de luz apresentaram valores menores e iguais. Para o rendimento quântico não regulado da dissipação não fotoquímica do fotossistema II (YNO), é possível ver que as plantas crescidas em luz vermelha apresentaram os maiores valores. Já para a luz azul, notam-se os menores valores de YNO.

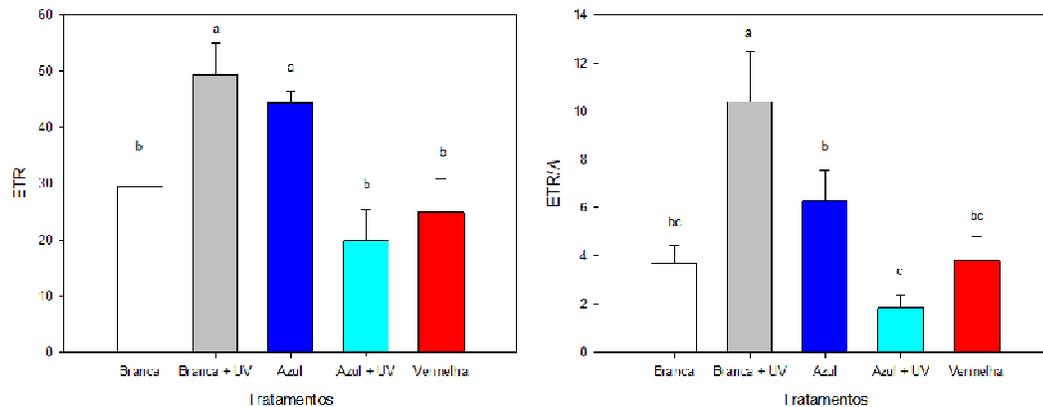


Figura 2. Taxa de transporte de elétrons (ETR) e razão entre taxa de transporte de elétrons e taxa fotossintética (ETR/A) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha.

Observando o coeficiente de dissipação não fotoquímica (NPQ), é possível ver que as plantas cultivadas em luz azul apresentaram valores maiores, enquanto as plantas sob luz vermelha apresentaram os menores valores, comportamento inverso ao observado em YNO.

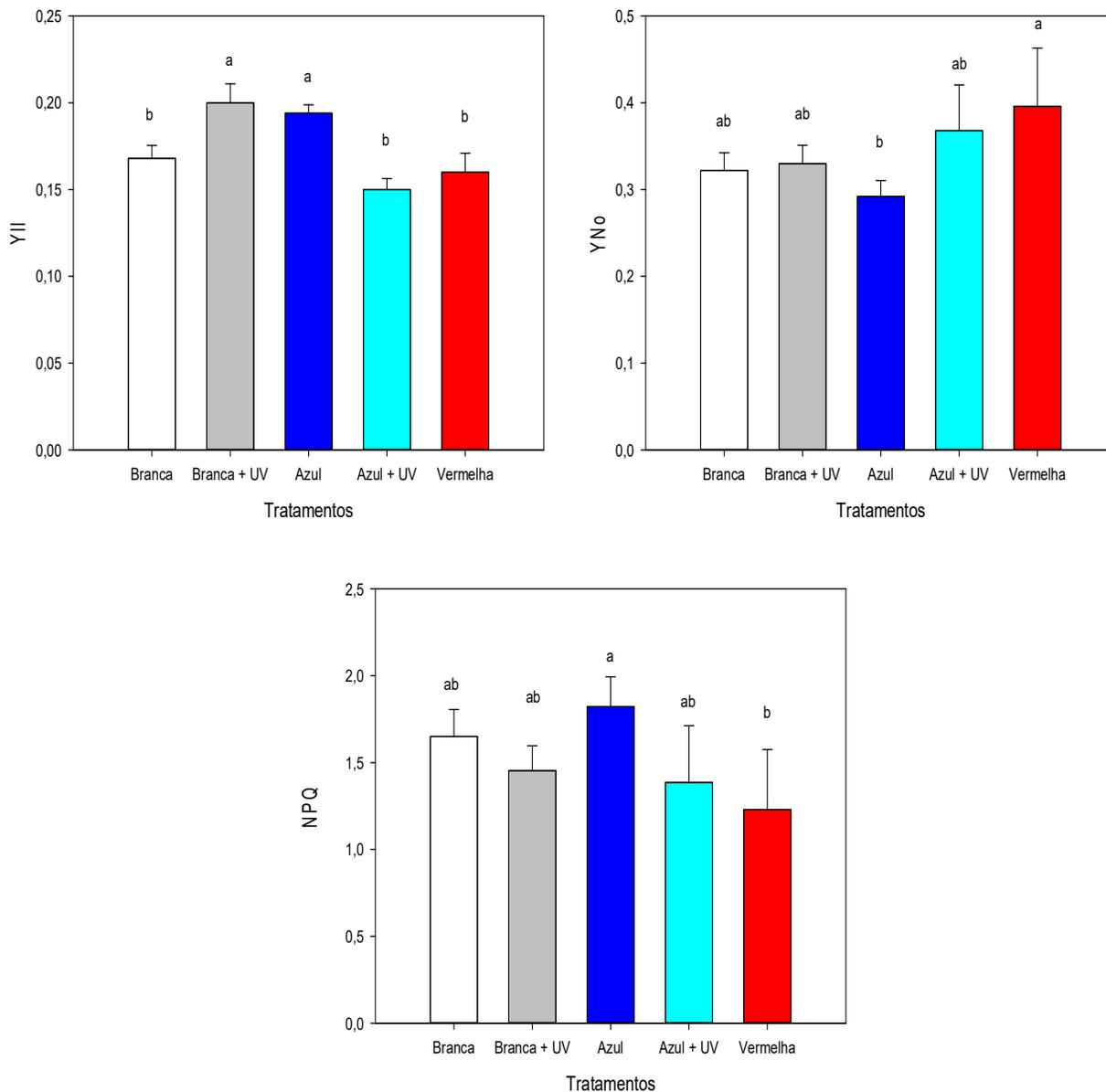


Figura 3. Parâmetros de fluorescência da clorofila a: rendimento quântico efetivo do fotossistema II (YII), rendimento quântico não regulado da dissipação não fotoquímica do fotossistema II (YNO) e coeficiente de extinção não fotoquímica da fluorescência (NPQ) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz,

associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha.

3.2. Determinação da respiração, fotorrespiração e pigmentos cloroplásticos em microtomateiro sob diferentes qualidades espectrais da luz e radiação UV-B

Na Figura 4, observa-se maior taxa respiratória das plantas crescidas em luz vermelha e menores valores para as plantas em luz Azul + UV. Ao mesmo tempo, quando determinada a proporção entre a taxa respiratória e a taxa fotossintética, nota-se comportamento semelhante.

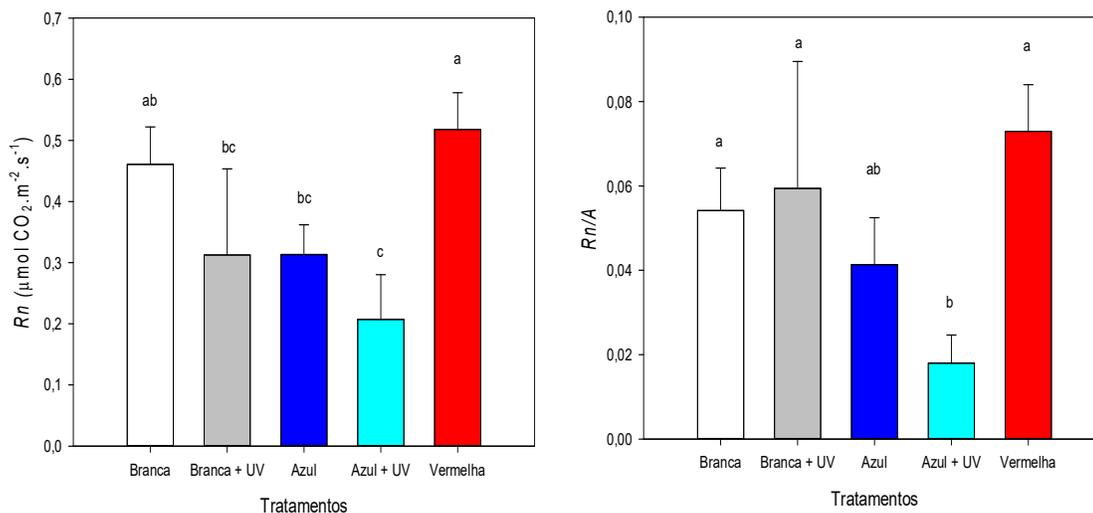


Figura 4. Taxa respiratória e razão entre taxa respiratória e taxa fotossintética em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha.

Com relação à fotorrespiração (Figura 5), nota-se que as plantas cultivadas na luz azul e branca + UV apresentaram maiores valores, enquanto as plantas crescidas em luz azul + UV apresentaram o menor valor (negativo).

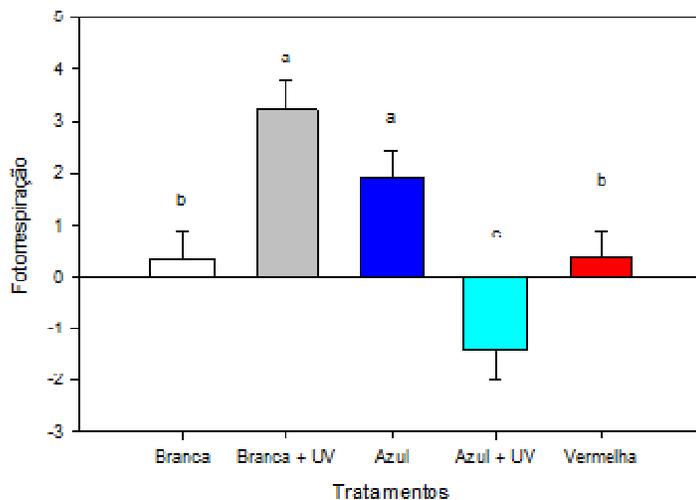


Figura 5. Fotorrespiração em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha.

Conforme se nota na Figura 6, houve diferença significativa no teor de clorofila *a*, *b* e total apenas entre as plantas sob luz branca, que apresentaram maiores quantidades de clorofilas, enquanto as plantas cultivadas sob luz azul apresentaram os menores valores.

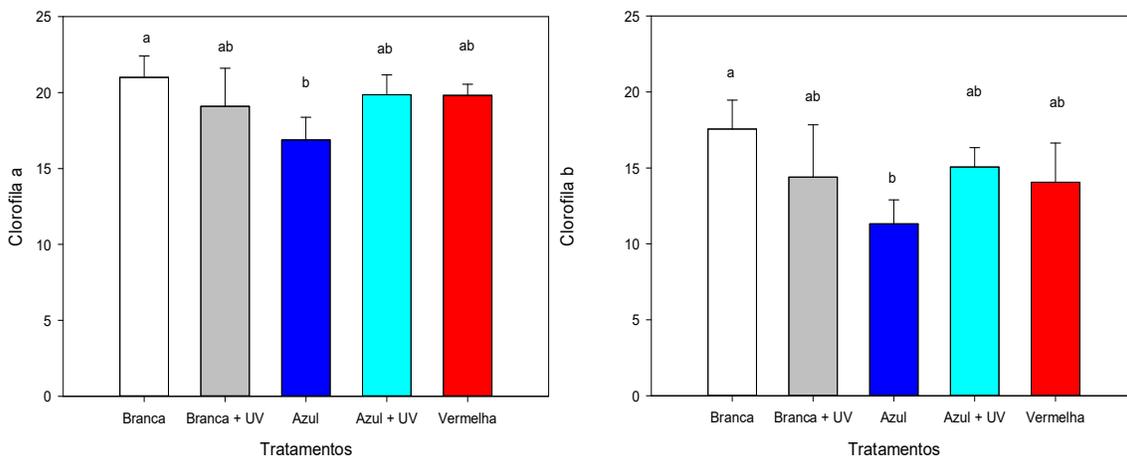


Figura 6. Pigmentos cloroplásticos (clorofila *a*, *b* e total) em Micro-Tom após 26 dias submetidos aos tratamentos de qualidades de luz, associados à radiação UV-B. As

plantas foram expostas aos seguintes tratamentos: luz branca, luz branca + UV, luz azul, luz azul + UV e luz vermelha.

3.3. Luz monocromática azul e radiação UV-B melhoram os níveis de rutina nos frutos de microtomateiro

Em todas as amostras analisadas, foi possível verificar presença de picos no tempo de retenção (26, 9 min) característico da rutina. Assim, pela equação da curva de calibração da rutina, obtida nas mesmas condições cromatográficas das amostras, foi feita a quantificação desse composto nas amostras de tomate. A Figura 7 mostra os teores de rutina ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrados nas amostras de tomate. É possível observar que as amostras submetidas às condições com luz azul e luz azul + UV foram as que apresentaram maiores valores de concentração para a rutina.

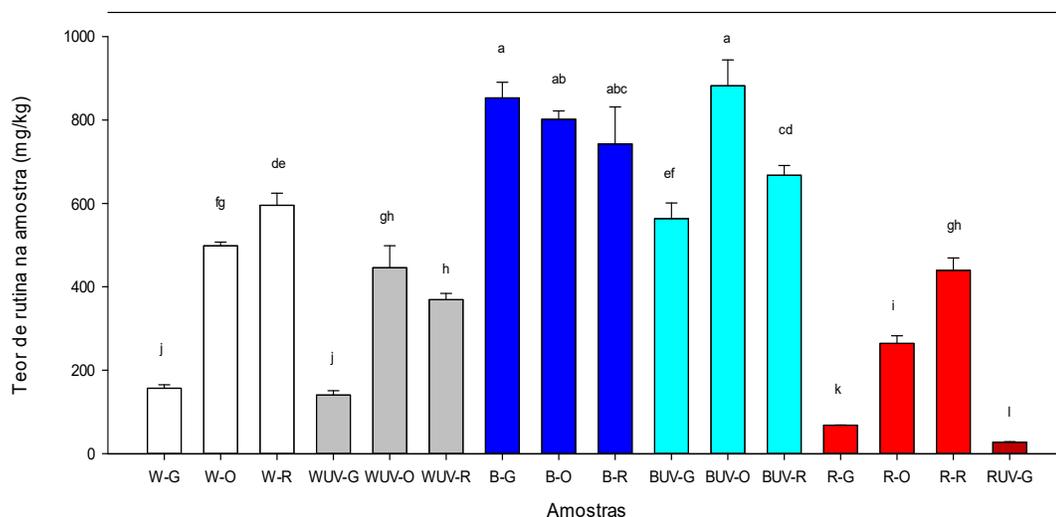


Figura 7. Quantidade de rutina encontrada nas amostras ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) de tomate submetidas a seis tratamentos de luz [Luz branca (W), Luz branca + Luz Ultravioleta (WUV), Luz azul (B), Luz azul + Luz Ultravioleta (BUV), Luz vermelha (R) e Luz vermelha + Luz Ultravioleta (RUV)] em diferentes estágios de coleta: tomate verde (G), tomate laranja (O) e tomate vermelho (R). Legenda da codificação das amostras: “Luz-Estágio”: Luzes: W: Luz branca; B: Luz azul; R: Luz vermelha; UV: Luz Ultravioleta; Estágios: G: Estágio verde; O: Estágio laranja; R: Estágio vermelho.

Nas Figuras 7, 8 e 9 e Tabela 1 observa-se o efeito significativo ($p < 0,05$) da luz azul em relação ao aumento da quantidade de rutina encontrada nas amostras de tomate

nos três estágios de desenvolvimento da planta. Menores teores de rutina foram encontrados para as amostras do estágio verde tratadas com luz vermelha e com a combinação da luz vermelha e ultravioleta. Valores baixos de rutina também foram encontrados para luz branca e sua combinação com a UV para o estágio verde.

Devido à morte das plantas, não foi possível quantificar os compostos das amostras de tomate submetidas à luz vermelha combinada com UV para os estágios laranja e vermelho da planta.

Foram feitos Testes T com duas amostras, presumindo variâncias diferentes. Valores de p menores que 0,05 foram considerados significativos. Assim, houve diferença significativa para os três estágios para a quantidade de rutina encontrada quando comparada com as amostras tratadas com luz branca.

Quando se comparou a luz branca associada à luz UV, não houve diferença significativa para a comparação entre o estágio laranja e o vermelho. Para os estágios verde e laranja e verde e vermelho, houve diferença significativa.

Tabela 1. Quantidade de rutina encontrada nas amostras (mg.kg^{-1}) de tomate submetidas a seis tratamentos de luz em diferentes estágios de coleta. Legenda da codificação das amostras: “Luz-Estágio”: Luzes: W: Luz branca; B: Luz azul; R: Luz vermelha; UV: Luz Ultravioleta; Estágios: G: Estágio verde; O: Estágio laranja; R: Estágio vermelho. DP: Desvio padrão e DPR: Desvio padrão relativo das injeções das amostras.

Código da amostra	Quantidade de rutina na amostra ($\mu\text{g.g}^{-1}$ ou mg.kg^{-1})	Quantidade média de rutina na amostra mg/kg	DP	DPR
W-G-1-1	149,760	156,686	8,29	5,29
W-G-1-2	149,291			
W-G-2-1	163,206			
W-G-2-2	164,488			
W-O-1-1	505,978	498,108	9,03	1,81
W-O-1-2	505,874			
W-O-2-1	490,057			
W-O-2-2	490,524			
W-R-1-1	583,881	595,616	29,07	4,88
W-R-1-2	584,830			
W-R-2-1	638,714			
W-R-2-2	575,040			

WUV-G-1-1	150,360			
WUV-G-1-2	148,563			
WUV-G-2-1	131,741	140,412	10,48	7,46
WUV-G-2-2	130,984			
WUV-O-1-1	401,873			
WUV-O-1-2	397,774			
WUV-O-2-1	492,021	445,542	52,82	11,86
WUV-O-2-2	490,500			
WUV-R-1-1	356,192			
WUV-R-1-2	356,005			
WUV-R-2-1	383,424			
WUV-R-2-2	380,422	369,011	14,96	4,05
B-G-1-1	817,151			
B-G-1-2	824,435			
B-G-2-1	882,977	853,141	37,53	4,40
B-G-2-2	887,999			
B-O-1-1	816,223			
B-O-1-2	821,650			
B-O-2-1	781,833	801,807	20,04	2,50
B-O-2-2	787,522			
B-R-1-1	669,415			
B-R-1-2	662,699			
B-R-2-1	813,951	742,725	88,68	11,94
B-R-2-2	824,834			
BUV-G-1-1	595,524			
BUV-G-1-2	596,839			
BUV-G-2-1	530,175	563,524	37,72	6,69
BUV-G-2-2	531,560			
BUV-O-1-1	936,513			
BUV-O-1-2	935,019			
BUV-O-2-1	822,817	882,059	62,18	7,05
BUV-O-2-2	833,888			
BUV-R-1-1	646,591			
BUV-R-1-2	648,202			
BUV-R-2-1	689,102	667,587	23,35	3,50
BUV-R-2-2	686,452			
R-G-1-1	68,467			
R-G-1-2	68,454			
R-G-2-1	68,299	68,234	0,35	0,52
R-G-2-2	67,715			
R-O-1-1	281,463			
R-O-1-2	278,420	264,072	18,42	6,98

R-O-2-1	246,472			
R-O-2-2	249,933			
R-R-1-1	468,628			
R-R-1-2	461,488	439,204	30,00	6,83
R-R-2-1	412,765			
R-R-2-2	413,935			
RUV-G-1-1	26,145			
RUV-G-1-2	26,091	27,357	1,43	5,24
RUV-G-2-1	28,488			
RUV-G-2-2	28,705			

Legenda da codificação das amostras: “Luz-Estágio-Preparação-Injeção”: W-G-1-1: Luz Branca- estágio verde -1ª preparação-1ª injeção; W-G-1-2: Luz Branca- estágio verde -1ª preparação-2ª injeção; W-G-2-1: Luz Branca- estágio verde -2ª preparação-1ª injeção; W-G-2-2: Luz Branca- estágio verde -2ª preparação-2ª injeção; W-O: Luz Branca- estágio Laranja; W-R: Luz Branca- estágio vermelho; WUV-G: Luz Branca + Luz Ultravioleta- estágio verde; WUV-O: Luz Branca + Luz Ultravioleta- estágio laranja; WUV-R: Luz Branca + Luz Ultravioleta- estágio vermelho; B-G: Luz Azul-estágio verde; B-O: Luz Azul- estágio laranja; B-R: Luz Azul- estágio vermelho; BUUV-G: Luz Azul + Luz ultravioleta-estágio verde; BUUV-O: Luz Azul+ Luz ultravioleta- estágio laranja; BUUV-R: Luz Azul+ Luz ultravioleta- estágio vermelho; R-G: Luz vermelha- estágio verde; R-O: Luz vermelha- estágio laranja; R-R: Luz vermelha- estágio vermelho; RUV-G: Luz vermelha+ Luz ultravioleta- estágio verde.

Para luz azul, não foi observada diferença significativa na quantidade de rutina encontrada nos três estágios comparados, já quando a luz azul foi associada com a UV, observou-se diferença.

Diferenças significativas nas concentrações de rutina também foram encontradas nas qualidades de luz vermelha para os três estágios comparados entre si.

Quando foram comparados os mesmos estágios com luz branca e luz branca associada à UV, apenas o estágio vermelho apresentou diferença na concentração de rutina. Para a luz azul em comparação com a luz azul com UV, apenas amostras do estágio verde da planta apresentaram diferença. Para as qualidades de luz vermelha e vermelha com UV, o estágio verde apresentou diferença.

Diferenças foram encontradas quando feita a comparação entre luz branca e luz azul (mesmos estágios), luz branca + UV e Luz azul + UV ((mesmos estágios), luz branca e luz vermelha (mesmos estágios) e luz branca + UV e Luz vermelha + UV (mesmos estágios).

Gráficos de superfície de resposta para a quantidade de rutina (mg/kg) em função dos estágios de coleta das amostras de tomate e dos tratamentos de luz

combinado com radiação ultravioleta e sem ultravioleta estão apresentados nas Figuras 8 e 9, respectivamente. Como pode ser observado, a luz azul (representada por 2,0 no gráfico) foi a que mais contribuiu para a produção de rutina nas amostras de tomate nos três estágios de maturação (sem UV e com UV).

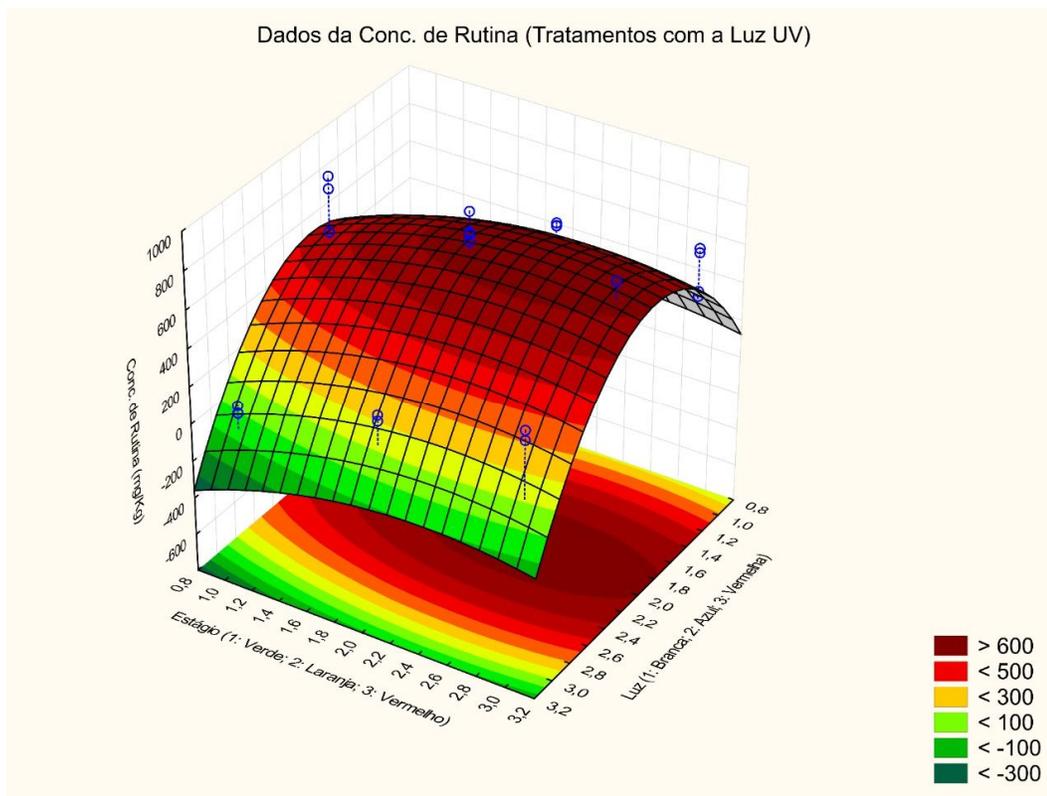


Figura 8. Gráfico de superfície de resposta para a quantidade de rutina (mg/kg) em função dos estágios de coleta das amostras de tomate e dos tratamentos de luz combinado com radiação Ultravioleta. Tratamento dos dados feito no StatSoft, Inc. (2014). STATISTICA (data analysis software system), version 12. www.statsoft.com.

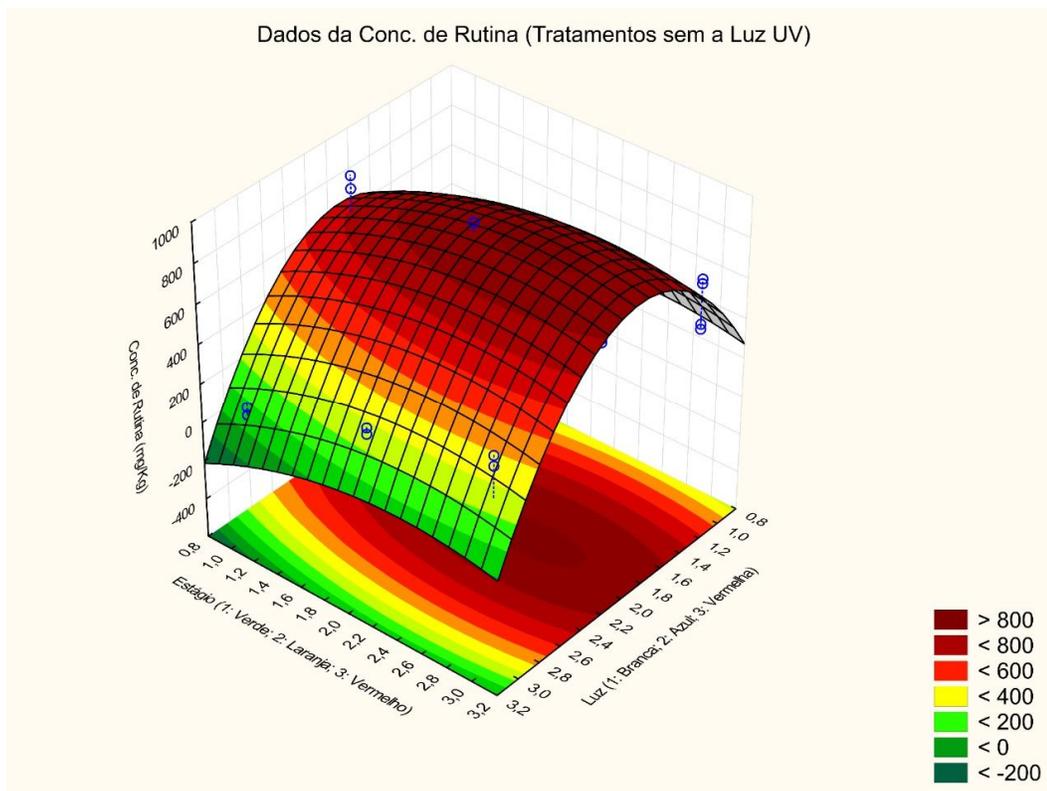


Figura 9. Gráfico de superfície de resposta para a quantidade de rutina (mg/kg) em função dos estágios de coleta das amostras de tomate e dos tratamentos de luz. Tratamento dos dados feito no StatSoft, Inc. (2014). STATISTICA (data analysis software system), version 12. www.statsoft.com.

3.4. Ácido clorogênico

Para todas as amostras analisadas, foi possível observar presença de pico no tempo de retenção em 15,6 min. O espectro resultante do pico em 15,65 min está apresentado na Figura 11. As bandas de absorção são bem características do ácido clorogênico.

Para fins de comparação, as áreas dos picos cromatográficos (Figura 12) foram utilizadas para avaliar o comportamento do ácido clorogênico nas diferentes amostras submetidas aos tratamentos de luz em diferentes estágios de maturação do tomate. Para minimizar erros na comparação entre as amostras que tinham massas diferentes no processo de extração, as áreas dos picos cromatográficos foram convertidas para massa de 0,1 g.

Foram feitos Testes T com as áreas dos picos encontradas para o ácido clorogênico para os diferentes tratamentos. Os valores de p menores que 0,05 foram

considerados significativos. Quando os estágios da luz branca foram comparados entre si, bem como a luz branca com luz ultravioleta, observou-se diferença significativa. Além disso, verifica-se maior resposta de área para os estágios verdes e menores para o estágio vermelho de maturação do tomate.

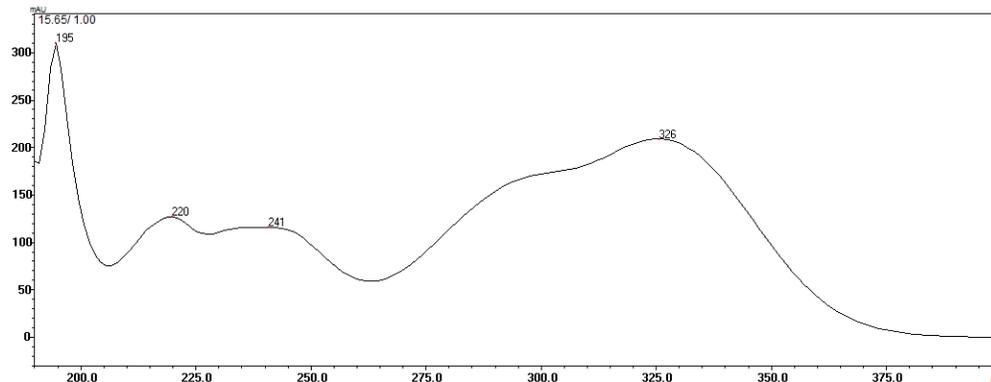


Figura 10. Espectrograma na faixa do ultravioleta para o pico presente no tempo de 15,65 min (ácido clorogênico).

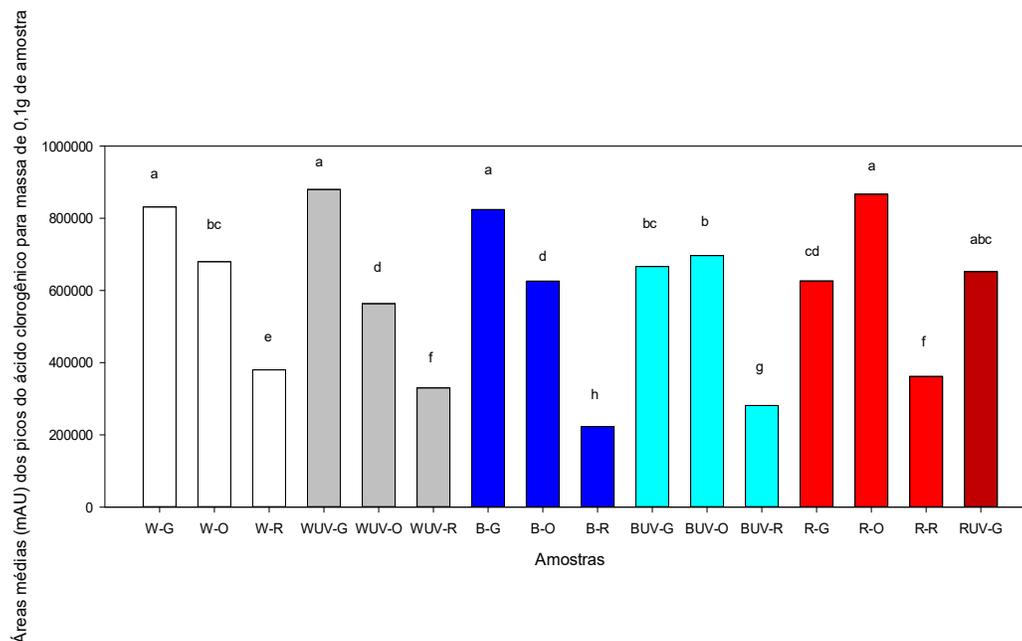


Figura 11. Áreas médias dos picos de ácido clorogênico encontradas para massa de 0,1 g de amostras de tomate submetidas a seis tratamentos de luz [Luz branca (W), Luz branca + Luz Ultravioleta (WUV), Luz azul (B), Luz azul + Luz Ultravioleta (BUV), Luz vermelha (R) e Luz vermelha + Luz Ultravioleta (RUV)] em diferentes estágios de coleta: tomate verde (G), tomate laranja (O) e tomate vermelho (R). Legenda da

codificação das amostras: “Luz-Estágio”: Luzes: W: Luz branca; B: Luz azul; R: Luz vermelha; UV: Luz Ultravioleta; Estágios: G: Estágio verde; O: Estágio laranja; R: Estágio vermelho.

Para a qualidade de luz azul, houve diferença significativa entre as áreas dos picos para o ácido clorogênico entre os estágios verde, laranja e vermelho. Entretanto, quando a luz azul foi associada à luz ultravioleta, não foi observada diferença entre os estágios verde e laranja, o que não ocorreu quando foram comparados os estágios laranja com o vermelho e verde com vermelho.

Houve diferença significativa para os três estágios para as áreas dos picos encontradas quando comparados com as amostras tratadas com luz vermelha. Mas não foi apresentada diferença quando o estágio verde submetido à luz vermelha foi comparado com a luz vermelha + UV, o mesmo foi verificado no estágio verde com luz branca comparada com luz branca + UV.

Sob as condições de luz branca comparados com luz branca + UV (para o mesmo estágio), foram constatadas diferenças significativas para o ácido clorogênico na fase laranja e vermelha.

Diferenças significativas foram encontradas nas qualidades de luz azul comparadas com luz azul + UV para os mesmos estágios comparados entre si.

Diferenças foram encontradas quando foi feita a comparação dos mesmos estágios entre luz branca e luz azul (para estágio laranja e vermelho), luz branca + UV e luz azul + UV (mesmos estágios) e luz branca e luz vermelha (mesmos estágios). Não houve diferença significativa de resposta de área do pico para o ácido clorogênico quando a luz branca e a luz azul foram comparadas no estágio verde e quando a luz branca + UV e a luz vermelha + UV (estágio verde) foram analisadas. Também não foi encontrada diferença para a luz azul + UV comparada com luz vermelha + UV para o estágio verde.

4. DISCUSSÃO

4.1. Efeitos dos tratamentos na fisiologia das plantas

Os parâmetros fotossintéticos bem como a morfologia e as taxas de abertura estomática são afetados pelo uso de luzes monocromáticas (Liu *et al.*, 2011; XiaoYing *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2016). Lanoue *et al.* (2017) observaram maiores taxas transpiratórias bem como maior Ci em tomates cultivados sob luz monocromática,

resultados em consonância com o presente estudo, em que a luz azul + UV apresentou a maior taxa transpiratória (Figura 1) e as luzes azul e azul + UV apresentaram os maiores valores de C_i (Figura 1). Como consequência, foi observada redução na eficiência do uso da água em tais condições (Figura 1).

Diversos estudos confirmam o fato de que a fotossíntese pode ser modulada em espécies cultivadas sob LEDs e que a síntese de metabólitos secundários é acentuada, especialmente quando se utilizam luzes monocromáticas azul ou vermelha, em comparação com a luz branca. Os efeitos individuais de cada comprimento de onda apresentam grande variação e dependem da espécie estudada e das condições de cultivo (Wu *et al.*, 2007; Li and Kubota, 2009; Johkan *et al.*, 2010; Bian, Yang and Liu, 2015; Lobiuc *et al.*, 2017). No presente estudo, a luz monocromática azul, associada à luz UV-B, favoreceu tanto o processo fotossintético, quanto o acúmulo dos compostos fenólicos identificados.

Altas intensidades de luz azul, como a utilizada neste trabalho ($300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), mostraram melhora na performance fotossintética de pimenta em estudo conduzido por Hoffmann *et al.* (2015). As plantas de Micro-Tom submetidas à luz azul + UV apresentaram comportamento semelhante, tendo sido observadas as maiores condutâncias estomáticas e, conseqüentemente, as maiores taxas fotossintéticas e transpiratórias, quando comparadas aos demais tratamentos (Figura 1). Esse comportamento pode estar relacionado a uma menor degradação de pigmentos fotossintéticos e também a um aumento na produção de compostos capazes de absorver a luz ultravioleta, que, normalmente, se expressam em maiores quantidades quando se associam luz azul e UV-B (Nascimento *et al.*, 2013; Ouzounis *et al.*, 2014; Hoffmann, Noga and Hunsche, 2015).

Apesar de os pigmentos fotossintéticos observados neste trabalho (clorofila *a*, *b* e total) (Figura 4) não terem sido os maiores nos tratamentos com luz azul, é provável que estes tratamentos tenham induzido a produção de outros pigmentos, como os carotenoides, que são pigmentos acessórios que invariavelmente aumentam em resposta à UV-B, tendo em vista que estão associados à absorção de luz neste espectro (Kurinjimalar *et al.*, 2019).

Palma *et al.* (2021) encontraram variação no conteúdo de clorofila semelhante ao encontrado neste trabalho, ocorrendo aumento no teor destes pigmentos em pimentão tratado com luz UV-B e branca associadas. Os resultados aqui apresentados são semelhantes aos observados pelos autores, em que a luz branca apresentou o maior teor

de clorofila entre todas as qualidades de luz utilizadas (Figura 4). Embora sejam encontrados resultados contrários em muitos estudos e na literatura, os autores destacam que as dosagens diferentes de UV-B bem como a proporção de luz e UV-B podem levar a diferenças no resultado.

Yang et al. (2018) observaram decréscimo no rendimento quântico efetivo do fotossistema II (YII) em plantas de tomate com aumento da intensidade luminosa, cultivadas sob luz azul e roxa, quando comparadas à luz branca, e aumento no rendimento quântico não regulado da dissipação não fotoquímica do fotossistema II (YNO) para as mesmas condições. Ao mesmo tempo, os autores observaram aumento no rendimento quântico regulado da dissipação não fotoquímica do fotossistema II (YNPQ) nas qualidades de luz azul e roxa, o que indica capacidade de indução de fotoproteção. Com relação à taxa de transporte de elétrons (ETR), as luzes azul e branca + UV se sobressaíram em relação às demais condições (Figura 5). Os autores encontraram maiores taxas de transporte de elétrons nas plantas crescidas sob luz branca e menores sob luz azul e roxa. Neste trabalho, ao determinar a razão da taxa de transporte de elétrons pela taxa fotossintética, foi observado que a luz branca + UV apresentou a maior razão, enquanto o tratamento de luz azul + UV, a menor razão, uma vez que a taxa fotossintética deste tratamento foi a maior.

Segundo Igamberdiev et al. (2013), a respiração e a fotorrespiração são reguladas pela expressão de genes e controladas por mudanças nos estados de oxidação, bem como por metabólitos produzidos pelo processo fotossintético e pela própria fotorrespiração. Os fitocromos medeiam a expressão desses genes, comprovando que a percepção da luz tem papel crucial nestas etapas. As maiores taxas respiratórias observadas na luz vermelha neste trabalho indicam maior demanda energética das plantas para contornar a situação estressante imposta por esta condição luminosa. Ademais, a fotorrespiração é uma forma de manter seu metabolismo em condições adversas, além de contribuir para a síntese de metabólitos importantes na tentativa de contornar estresses, caso do maior estresse luminoso observado nas condições de luz branca + UV e azul.

4.2. Efeitos das qualidades de luz no acúmulo de metabólitos secundários

Compostos fenólicos são influenciados por fatores genéticos, associados ao processo de amadurecimento e ao metabolismo de compostos fenólicos da planta (Scalzo *et al.*, 2005; Atkinson *et al.*, 2006; Paula *et al.*, 2015)

Vários fatores podem levar à variação quantitativa de um flavonoide específico em uma planta como ataque de pragas, estresse climático, radiação ultravioleta e outras fontes como o local de cultivo, práticas agrícolas, colheita e armazenamento, condições e métodos de processamento e preparação, bem como variabilidade analítica entre outros condicionantes, e tanto a localização quanto a cultivar respondem por 25% a 33% da variabilidade, respectivamente (Haytowitz, Bhagwat and Holden, 2013; Verma *et al.*, 2019).

Neste trabalho, foram confirmados e quantificados altos teores de rutina, especialmente nas qualidades de luz azul e luz azul + UV. Diversos trabalhos encontraram resultados semelhantes, sendo a rutina o principal composto fenólico quantificado (Blasa *et al.*, 2010; Vallverdú-Queralt *et al.*, 2012; Flores *et al.*, 2021).

Fleuriet e Macheix (2003) mencionam que o ácido clorogênico ocorre em maiores concentrações nos frutos de tomates do tipo verde e diminui consideravelmente no final da coloração. Em trabalho desenvolvido por Baltacıoglu *et al.* (2021), o ácido clorogênico foi detectado como o principal composto fenólico em extratos de tomate. Além disso, pela análise das áreas para o ácido clorogênico, nota-se neste estudo que os estágios verdes apresentam maiores teores deste bioativo, sendo reduzido conforme o fruto vai amadurecendo. Tal observação está consonante também com Meléndez-Martínez *et al.* (2010) e Verheul *et al.* (2015), que observaram diminuição deste composto com o grau mais avançado de maturação do tomate.

Rodríguez *et al.* (2018) mencionam que há mais acúmulo de compostos fenólicos na casca do tomate do que nas sementes e na polpa. No presente trabalho, o fruto inteiro foi avaliado.

Com base no espectro de UV, acredita-se que o pico observado no tempo de retenção em 15,6 min se refere ao ácido clorogênico, composto que tem sido relatado com frequência em amostras de tomate (Meléndez-Martínez, Fraser and Bramley, 2010; Vallverdú-Queralt *et al.*, 2012; Verheul, Slimestad and Tjøstheim, 2015; Perea-Domínguez *et al.*, 2018; Flores *et al.*, 2021).

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que o cultivo de Micro-Tom sob luzes de LED azul e azul + UV é favorável tanto para promover aumento na taxa fotossintética, quando para aumentar a produção de compostos bioativos. Derivados do metabolismo primário, os compostos que fazem parte do metabolismo secundário utilizam os esqueletos carbônicos gerados principalmente pelo processo fotossintético para serem produzidos. Além disso, fica claro que a luz é um efetivo

elicitor para o incremento na produção destas moléculas, conforme demonstrado neste trabalho e corroborado por muitos outros estudos. A compreensão dos resultados aqui mostrado é fundamental para a construção do conhecimento acerca das diferentes qualidades de luz e sua influência sobre diferentes culturas. Além disso, produzir alimentos mais ricos em compostos bioativos é de grande importância para melhorar a qualidade de vida da população que consumirá estes alimentos. Esses resultados fornecem uma base teórica sólida para elucidar ainda mais o mecanismo por trás da regulação pela luz azul e associado à UV-B na síntese de rutina em tomates e para instituir uma nova geração de inovações tecnológicas para o aumento de metabólitos secundários na produção agrícola.

5. REFERÊNCIAS

Atkinson, C.J. *et al.* (2006) “Effects of cultivar, fruit number and reflected photosynthetically active radiation on *Fragaria x ananassa* productivity and fruit ellagic acid and ascorbic acid concentrations,” *Annals of Botany*, 97(3), pp. 429–441. doi:10.1093/aob/mcj046.

Baltacıoğlu, H. *et al.* (2021) “Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from tomato: Characterization by FTIR and HPLC and comparison with conventional solvent extraction,” *Vibrational Spectroscopy*, 113(December 2020). doi:10.1016/j.vibspec.2020.103204.

Bian, Z. *et al.* (2018) “Uncovering LED light effects on plant growth: New angles and perspectives – LED light for improving plant growth, nutrition and energy-use efficiency,” *Acta Horticulturae*, 1227. doi:10.17660/actahortic.2018.1227.62.

Bian, Z.H., Yang, Q.C. and Liu, W.K. (2015) “Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: A review,” *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(5), pp. 869–877. doi:10.1002/jsfa.6789.

Blasa, M. *et al.* (2010) *Fruit and vegetable antioxidants in health*. First Edit, *Bioactive Foods in Promoting Health*. First Edit. Elsevier Inc. doi:10.1016/B978-0-12-374628-3.00003-7.

Chaudhary, P. *et al.* (2018) “Bioactivities of phytochemicals present in tomato,” *Journal of Food Science and Technology*, 55(8), pp. 2833–2849. doi:10.1007/s13197-018-3221-z.

Chua, L.S. (2013) “A review on plant-based rutin extraction methods and its pharmacological activities,” *Journal of Ethnopharmacology*, 150(3), pp. 805–817. doi:10.1016/j.jep.2013.10.036.

Chutimanukul, P. *et al.* (2022) “The influence of different light spectra on physiological responses, antioxidant capacity and chemical compositions in two holy basil cultivars,” *Scientific Reports*, 12(1), pp. 1–17. doi:10.1038/s41598-021-04577-x.

Fang, M.H. *et al.* (2020) “Ultra-high-efficiency near-infrared Ga₂O₃:Cr³⁺+phosphor and controlling of phytochrome,” *Journal of Materials Chemistry C*, 8(32), pp. 11013–11017. doi:10.1039/d0tc02705g.

Fanwoua, J. *et al.* (2019) “Supplemental LED lighting affects the dynamics of tomato fruit growth and composition,” *Scientia Horticulturae*, 256. doi:10.1016/j.scienta.2019.108571.

Fleuriet, A.; Macheix, J.J. Phenolic acids in fruits and vegetables. In: RICE-EVANS, C.; PACKER, LESTER. *Flavonoids in health and disease*. 2nd edition. New York: Marcel Dekker, Inc. p. 1-42. 2003.

Flores, I.R. *et al.* (2021) “Bioactive compounds in tomato (*Solanum lycopersicum*) variety saladette and their relationship with soil mineral content,” *Food Chemistry*, 344, p. 128608. doi:10.1016/j.foodchem.2020.128608.

Gómez, C. and Izzo, L.G. (2018) “Increasing efficiency of crop production with LEDs,” *AIMS Agriculture and Food*, 3(2), pp. 135–153. doi:10.3934/agrfood.2018.2.135.

Haytowitz, D.B., Bhagwat, S. and Holden, J.M. (2013) “Sources of Variability in the Flavonoid Content of Foods,” *Procedia Food Science*, 2, pp. 46–51. doi:10.1016/j.profoo.2013.04.008.

Hoffmann, A.M., Noga, G. and Hunsche, M. (2015) “High blue light improves acclimation and photosynthetic recovery of pepper plants exposed to UV stress,” *Environmental and Experimental Botany*, 109, pp. 254–263. doi:10.1016/j.envexpbot.2014.06.017.

Igamberdiev, A.U. *et al.* (2013) “Phytochrome-mediated regulation of plant respiration and photorespiration INTRODUCTION: THE MODE OF ACTION OF.” doi:10.1111/pce.12155.

Johkan, M. *et al.* (2010) “Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce,” *HortScience*, 45(12), pp. 1809–1814. doi:10.21273/hortsci.45.12.1809.

Kianersi, F. *et al.* (2020) “Identification and tissue-specific expression of rutin biosynthetic pathway genes in *Capparis spinosa* elicited with salicylic acid and methyl jasmonate,” *Scientific Reports*, 10(1), pp. 1–15. doi:10.1038/s41598-020-65815-2.

Kim, Y.J. *et al.* (2015) “Accumulation of Phenylpropanoids by White, Blue, and Red Light Irradiation and Their Organ-Specific Distribution in Chinese Cabbage (*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*),” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(30), pp. 6772–6778. doi:10.1021/acs.jafc.5b02086.

Kim, Y.J. *et al.* (2018) “Ice plant growth and phytochemical concentrations are affected by light quality and intensity of monochromatic light-emitting diodes,” *Horticulture Environment and Biotechnology*, 59(4), pp. 529–536. doi:10.1007/s13580-018-0058-3.

Ko, E.Y. *et al.* (2015) “Effect of different exposed lights on quercetin and quercetin glucoside content in onion (*Allium cepa* L.),” *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(4), pp. 398–403. doi:10.1016/j.sjbs.2014.11.012.

Kurinjimalar, C. *et al.* (2019) “Impact of ultraviolet-B radiation on growth and biochemical composition of *Botryococcus braunii* Kutz,” *Current Science*, 116(1), pp. 89–95. doi:10.18520/cs/v116/i1/89-95.

Landi, M. *et al.* (2020) “Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review,” *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics*, 1861(2), p. 148131. doi:10.1016/j.bbabi.2019.148131.

Lanoue, J. *et al.* (2017) “The effect of spectral quality on daily patterns of gas exchange, biomass gain, and water-use-efficiency in tomatoes and lisianthus: An assessment of

whole plant measurements,” *Frontiers in Plant Science*, 8(June), pp. 1–15. doi:10.3389/fpls.2017.01076.

Li, Q. and Kubota, C. (2009) “Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce,” *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), pp. 59–64. doi:10.1016/j.envexpbot.2009.06.011.

Liu, H.K. *et al.* (2016) “The influence of light-emitting diodes on the phenolic compounds and antioxidant activities in pea sprouts,” *Journal of Functional Foods*, 25, pp. 459–465. doi:10.1016/j.jff.2016.06.028.

Liu, H.K. *et al.* (2019) “Effects of elicitation on bioactive compounds and biological activities of sprouts,” *Journal of Functional Foods*, 53(13), pp. 136–145. doi:10.1016/j.jff.2018.12.019.

Liu, X.Y. *et al.* (2011) “Effect of different light quality of LED on growth and photosynthetic character in cherry tomato seedling,” *Acta Horticulturae*, 907, pp. 325–330. doi:10.17660/ActaHortic.2011.907.53.

Liu, Y. *et al.* (2018) “Light quality affects flavonoid production and related gene expression in *Cyclocarya paliurus*,” *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 179(July 2017), pp. 66–73. doi:10.1016/j.jphotobiol.2018.01.002.

Lobiuc, A. *et al.* (2017) “Blue and red LED illumination improves growth and bioactive compounds contents in acyanic and cyanic *Ocimum basilicum* L. Microgreens,” *Molecules*, 22(12). doi:10.3390/molecules22122111.

Lu, Z. *et al.* (2019) “Sustainable valorisation of tomato pomace: A comprehensive review,” *Trends in Food Science and Technology*, 86(July 2018), pp. 172–187. doi:10.1016/j.tifs.2019.02.020.

Mata-Nicolás, E. *et al.* (2020) “Exploiting the diversity of tomato: the development of a phenotypically and genetically detailed germplasm collection,” *Horticulture Research*, 7(1). doi:10.1038/s41438-020-0291-7.

Meléndez-Martínez, A.J., Fraser, P.D. and Bramley, P.M. (2010) “Accumulation of health promoting phytochemicals in wild relatives of tomato and their contribution to in vitro antioxidant activity,” *Phytochemistry*, 71(10), pp. 1104–1114. doi:10.1016/j.phytochem.2010.03.021.

Mosadegh, H. *et al.* (2018) “Applications of UV-B lighting to enhance phenolic accumulation of sweet basil,” *Scientia Horticulturae*, 229(July 2017), pp. 107–116. doi:10.1016/j.scienta.2017.10.043.

Nam, T.G., Kim, D.O. and Eom, S.H. (2018) “Effects of light sources on major flavonoids and antioxidant activity in common buckwheat sprouts,” *Food Science and Biotechnology*, 27(1), pp. 169–176. doi:10.1007/s10068-017-0204-1.

Nascimento, L.B.S. *et al.* (2013) “Increased antioxidant activity and changes in phenolic profile of *Kalanchoe pinnata* (Lamarck) persoon (crassulaceae) specimens grown under supplemental blue light,” *Photochemistry and Photobiology*, 89(2), pp. 391–399. doi:10.1111/php.12006.

Neugart, S. and Schreiner, M. (2018) “UVB and UVA as eustressors in horticultural and agricultural crops,” *Scientia Horticulturae*, 234(October 2017), pp. 370–381. doi:10.1016/j.scienta.2018.02.021.

Ouzounis, T. *et al.* (2014) “Spectral effects of supplementary lighting on the secondary metabolites in roses, chrysanthemums, and campanulas,” *Journal of Plant Physiology*, 171(16), pp. 1491–1499. doi:10.1016/j.jplph.2014.06.012.

Palma, C.F.F. *et al.* (2021) “Spectral Composition of Light Affects Sensitivity to UV-B and Photoinhibition in Cucumber,” *Frontiers in Plant Science*, 11(January), pp. 1–14. doi:10.3389/fpls.2020.610011.

Park, C.H. *et al.* (2019) “Effects of light-emitting diodes on the accumulation of glucosinolates and phenolic compounds in sprouting canola (*Brassica napus* L.),” *Foods*, 8(2), pp. 1–9. doi:10.3390/foods8020076.

Paula, J.T. *et al.* (2015) “Características físico-químicas e compostos bioativos em frutos de tomateiro colhidos em diferentes estádios de maturação,” *Horticultura Brasileira*, 33(4), pp. 434–440. doi:10.1590/s0102-053620150000400005.

Perea-Domínguez, X.P. *et al.* (2018) “Phenolic composition of tomato varieties and an industrial tomato by-product: free, conjugated and bound phenolics and antioxidant activity,” *Journal of Food Science and Technology*, 55(9), pp. 3453–3461. doi:10.1007/s13197-018-3269-9.

Ribeiro, V.R. *et al.* (2019) “Bringing together *Saccharomyces cerevisiae* and bioactive compounds from plants: A new function for a well-known biosorbent,” *Journal of Functional Foods*, 60(June), p. 103433. doi:10.1016/j.jff.2019.103433.

Rivero-Montejo, S. de J., Vargas-Hernandez, M. and Torres-Pacheco, I. (2021) “Nanoparticles as novel elicitors to improve bioactive compounds in plants,” *Agriculture (Switzerland)*, 11(2), pp. 1–16. doi:10.3390/agriculture11020134.

Rodríguez, D.D.I. *et al.* (2018) “Antioxidant content in skin and seeds of three tomato varieties grown in two regions of Mexico,” *International Journal of Food and Nutritional Science*, 7(3), pp. 1–14.

Ronga, D. *et al.* (2020) “Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability,” *Agronomy*, 10(1). doi:10.3390/agronomy10010138.

Rubén, D. *et al.* (2020) “Tomato as Potential Source of Natural Additives for,” *Antioxidants*, 9(1), p. 73.

Scalzo, J. *et al.* (2005) “Plant genotype affects total antioxidant capacity and phenolic contents in fruit,” *Nutrition*, 21(2), pp. 207–213. doi:10.1016/j.nut.2004.03.025.

Semwal, R. *et al.* (2021) “Health benefits and limitations of rutin - A natural flavonoid with high nutraceutical value,” *Phytochemistry Letters*, 46(June), pp. 119–128. doi:10.1016/j.phytol.2021.10.006.

Shih, M.L. and Morgan, J.A. (2020) “Metabolic flux analysis of secondary metabolism in plants,” *Metabolic Engineering Communications*, 10(October 2019), p. e00123. doi:10.1016/j.mec.2020.e00123.

Silva, T.D. *et al.* (2020) “Blue and red light affects morphogenesis and 20-hydroxyecdysone content of in vitro *Pfaffia glomerata* accessions,” *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 203(October 2019), p. 111761. doi:10.1016/j.jphotobiol.2019.111761.

Taulavuori, K. *et al.* (2016) “Species-specific differences in synthesis of flavonoids and phenolic acids under increasing periods of enhanced blue light,” *Environmental and Experimental Botany*, 121, pp. 145–150. doi:10.1016/j.envexpbot.2015.04.002.

Taulavuori, K. *et al.* (2018) “Responses of phenolic acid and flavonoid synthesis to blue and blue-violet light depend on plant species,” *Environmental and Experimental Botany*, 150, pp. 183–187. doi:10.1016/j.envexpbot.2018.03.016.

Thoma, F. *et al.* (2020) “Effects of Light on Secondary Metabolites in Selected Leafy Greens: A Review,” *Frontiers in Plant Science*, 11(April), pp. 1–15. doi:10.3389/fpls.2020.00497.

Thwe, A.A. *et al.* (2014) “Effects of light-emitting diodes on expression of phenylpropanoid biosynthetic genes and accumulation of phenylpropanoids in *Fagopyrum tataricum* sprouts,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(21), pp. 4839–4845. doi:10.1021/jf501335q.

Vallverdú-Queralt, A. *et al.* (2012) “Evaluation of a method to characterize the phenolic profile of organic and conventional tomatoes,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(13), pp. 3373–3380. doi:10.1021/jf204702f.

Verheul, M.J., Slimestad, R. and Tjøstheim, I.H. (2015) “From Producer to Consumer: Greenhouse Tomato Quality as Affected by Variety, Maturity Stage at Harvest, Transport Conditions, and Supermarket Storage,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(20), pp. 5026–5034. doi:10.1021/jf505450j.

Verma, M.L. *et al.* (2019) *Bioflavonoids: Synthesis, functions and biotechnological applications, Biotechnological Production of Bioactive Compounds*. Elsevier B.V. doi:10.1016/B978-0-444-64323-0.00003-5.

Wang, J. *et al.* (2016) “Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light,” *Frontiers in Plant Science*, 7(MAR2016), pp. 1–10. doi:10.3389/fpls.2016.00250.

Wang, P. *et al.* (2020) “Exploration of the effects of different blue led light intensities on flavonoid and lipid metabolism in tea plants via transcriptomics and metabolomics,” *International Journal of Molecular Sciences*, 21(13), pp. 1–18. doi:10.3390/ijms21134606.

Wu, M.C. *et al.* (2007) “A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings,” *Food Chemistry*, 101(4), pp. 1753–1758. doi:10.1016/j.foodchem.2006.02.010.

XiaoYing, L. *et al.* (2011) “Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves, and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of light-emitting diodes,” *HortScience*, 46(2), pp. 217–221. doi:10.21273/hortsci.46.2.217.

Yang, X. *et al.* (2018) “Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength,” *Environmental and Experimental Botany*, 150, pp. 161–171. doi:10.1016/j.envexpbot.2018.03.013.

Zhang, X. *et al.* (2019) “Comparative Analysis of Phenolic Compound Profiles, Antioxidant Capacities, and Expressions of Phenolic Biosynthesis-Related Genes in Soybean Microgreens Grown under Different Light Spectra,” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(49), pp. 13577–13588. doi:10.1021/acs.jafc.9b05594.

ZOU, J. *et al.* (2020) “The effect of artificial solar spectrum on growth of cucumber and lettuce under controlled environment,” *Journal of Integrative Agriculture*, 19(8), pp. 2027–2034. doi:10.1016/S2095-3119(20)63209-9.

Zushi, K., Suehara, C. and Shirai, M. (2020) “Effect of light intensity and wavelengths on ascorbic acid content and the antioxidant system in tomato fruit grown in vitro,” *Scientia Horticulturae*, 274(August), p. 109673. doi:10.1016/j.scienta.2020.109673.