

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE, DIRETORIA DE
PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA

**COMPOSIÇÃO ESPECTRAL E REGIME DA ILUMINAÇÃO
ARTIFICIAL NA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO
MORANGUEIRO EM AMBIENTE CONTROLADO**

Autor: Carlos Henrique Pereira Bento

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva

Coorientadora: Dra. Fábria Barbosa da Silva

Coorientador: Dr. Márcio Rosa

Coorientadora: Dra. Eliane Vieira Rosa

RIO VERDE – GO
junho – 2023

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE, DIRETORIA DE
PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO,
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROQUÍMICA**

**COMPOSIÇÃO ESPECTRAL E REGIME DA ILUMINAÇÃO
ARTIFICIAL NA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO
MORANGUEIRO EM AMBIENTE CONTROLADO**

Autor: Carlos Henrique Pereira Bento

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva

Coorientadora: Dra. Fábila Barbosa da Silva

Coorientador: Dr. Márcio Rosa

Coorientadora: Dra. Eliane Vieira Rosa

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM AGROQUÍMICA, no Programa de Pós-Graduação em Agroquímica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de concentração Agroquímica Orgânica.

RIO VERDE – GO
junho – 2023

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

BB478c Bento, Carlos Henrique Pereira
COMPOSIÇÃO ESPECTRAL E REGIME DA ILUMINAÇÃO
ARTIFICIAL NA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO
MORANGUEIRO EM AMBIENTE CONTROLADO / Carlos Henrique
Pereira Bento; orientador Fabiano Guimarães Silva;
co-orientadora Fábila Barbosa da Silva. -- Rio Verde,
2023.
60 p.

Dissertação (Mestrado em Mestrado em Agroquímica) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2023.

1. Aeroponia. 2. Fragaria x ananassa.. 3.
Alimentos nutraceuticos. 4. Flutuação de luz. 5.
Fazendas Urbanas. I. Silva, Fabiano Guimarães,
orient. II. Silva, Fábila Barbosa da, co-orient. III.
Título.

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:

Carlos Henrique Pereira Bento

Matrícula:

2021202310340009

Título do trabalho:

COMPOSIÇÃO ESPECTRAL E REGIME DA ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL NA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO MORANGUEIRO EM AMBIENTE CONTROLADO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01 /08 /2023

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 inclusos 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.

	Documento assinado digitalmente CARLOS HENRIQUE PEREIRA BENTO Data: 12/07/2023 22:55:11-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	Rio Verde	Local	12 /07 /2023	Data
---	--	-----------	-------	--------------	------

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

 Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente

FABIANO GUIMARAES SILVA
Data: 04/08/2023 07:33:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



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

Documentos 51/2023 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

COMPOSIÇÃO ESPECTRAL E REGIME DA ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL NA QUALIDADE E
PRODUTIVIDADE DO MORANGUEIRO EM AMBIENTE CONTROLADO

Autor: Carlos Henrique Pereira Bento
Orientador: Fabiano Guimarães Silva

TITULAÇÃO: Mestre em Agroquímica - Área de Concentração Agroquímica

APROVADA em 06 de junho de 2023.

Prof.^a Dr.^a Simone da Costa Mello
Avaliadora externa - ESALQ - USP

Dr. Ítalo Moraes Rocha Guedes
Avaliador externo - EMBRAPA
Hortaliças

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

Documento assinado eletronicamente por:

- Ítalo Moraes Rocha Guedes, Ítalo Moraes Rocha Guedes - Professor Avaliador de Banca - Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças-Cnph- Embrapa (00348003005503), em 06/06/2023 17:25:07.
- Simone da Costa Mello, Simone de Costa Mello - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 06/06/2023 17:22:51.
- Fabiano Guimaraes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/06/2023 17:12:28.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/06/2023. 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: 501579
Código de Autenticação: fd504f5a1c



AGRADECIMENTOS

Meus primeiros agradimentos são dedicados a Deus, aquele que sempre me abençoou com dádivas esplendorosas em minha vida. A Ti Senhor, todo o meu amor.

À minha família, imensa gratidão, por sempre acreditarem que sou capaz vencer grandes desafios, também por estarem sempre ao meu lado transbordando força e amor, especialmente meus pais Maria de Fatima Pereira e José Bento Gonzaga, meus avós Vanilda Pereira Ramos e Dionésio Costa Ramos, Divina Bento Gonzaga e José Cicero Bento e minha irmã Carla Raniele Pereira Bento e ao meu companheiro, Rafael Borges, pelo suporte durante toda essa jornada.

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.

Aos meus coorientadores, especialmente Dra. Fábiana Barbosa da Silva, com quem além de trabalhar, tive a oportunidade de conhecer sua verdadeira e pura essência, uma amiga que levo sempre em minha caminhada, além das contribuições grandiosas com sugestões buscando sempre melhorias, com conhecimento vasto na fisiologia vegetal. Ao professor, Dr. Márcio Rosa, um querido e amigo, sempre contribuindo com sua expertise na fisiologia vegetal e bioquímica e uma humildade extraordinária. A querida professora, Dra. Eliane Vieira Rosa, que me incentivou a ingressar ao mestrado e sempre esteve ao meu lado aconselhado e ensinando a lutar a cada obstáculo imposto pela vida. A vocês, meu eterno obrigado, são inspirações de profissionais e pessoas que fazem seus trabalhos com amor, dedicação e perfeição.

Aos Drs. Érica Letícia e Jaliston Júlio, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, que foram extremamente solícitos e colaboraram com excelência para a realização, respectivamente, das análises da atividade antioxidante e a estima do teor compostos bioativos. A professora, Dra. Érika Crispim, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Iporá por receber, atender e compartilhar excelente conhecimento para a realização das análises feitas em espectrofotômetro UV-Visível.

A todos os meus colegas do Complexo de Laboratório de Biotecnologia Vegetal, em especial, a equipe do Laboratório de Estudos Avançados em Agricultura Vertical (LEAV) onde conduzi meu trabalho, com os quais pude compartilhar aprendizados para a vida, permitindo momentos que levarei em minha memória. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade de ter sido qualificado como mestre, de um programa de pós-graduação de excelência e referência, 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

Carlos Henrique Pereira Bento, nascido em Nova Crixás – GO em 05 de janeiro de 1997, residente em Rio Verde – GO, filho de Maria de Fátima Pereira e José Bento Gonzaga.

Cursou Técnico em Agropecuária em 2012, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres, onde desempenhou atividades voluntárias no Laboratório de Biologia e Bioquímica por dois semestres. Em 2015, ingressou no curso de graduação em Licenciatura em Ciências Biológicas, pelo Instituto Federal de Ceres e atuou como aluno de iniciação científica por quatro semestres.

Em 2021, ingressou no Programa de Pós-graduação em Agroquímica, Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Fabiano Guimarães Silva, na linha de pesquisa de Agroquímica Orgânica, trabalhando com a produção de morangos em agricultura vertical indoor com iluminação de LEDs visando a produção de hortifrúti ricos em bioativos e com valor agregado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 Material vegetal e condições de crescimento	15
2.2 Variáveis avaliadas	18
2.2.1 Avaliações fisiológicas e pigmentos cloroplastídicos	18
2.2.2 Análises biométricas	19
2.2.3 Acidez titulável e teor de sólidos soluveis dos frutos	19
2.2.4 Determinação do teor fenólicos totais e flavonoides totais	19
2.2.5 Análise da atividade de enzimas antioxidantes e conteúdo de estresse oxidativo	20
2.2.4 Análise estatística	21
3. RESULTADOS	21
3.1. Parâmetros fotossintéticos	21
3.3. Atividade de enzimas antioxidantes de defesa e conteúdo de malonaldeído.	42
3.4. Produtividade e qualidade dos frutos	43
3.5. Análise de componentes principais (PCA) da atividade antioxidante de enzimas de defesa, conteúdo de malondialdeído, °Brix, pH e acidez	47
4. DISCUSSÃO	49
5. CONCLUSÃO	54
6. REFERÊNCIAS	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Performance da fluorescência da clorofila a. de plantas de morango cultivadas em ambiente *indoor* de agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branca, RBW 3:1:1, azul e vermelha), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).....4

Tabela 2: Desempenho das trocas gasosas de plantas de morango cultivadas em ambiente *indoor* de agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branca, RBW 3:1:1, azul e vermelha), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação)..... 33

ÍNDICE DE FIGURAS.

- Figura 1:** Plantas de morango cultivadas em agricultura vertical aeropônica em cabines isoladas com diferentes qualidades espectrais de luzes de LEDs, monocromáticas vermelha e azul e combinadas branca e RBW. Imagem do acervo pessoal. 17
- Figura 2:** Esquematização do delineamento experimental, com 2 regimes de iluminação (constante e senoidal que simula a curva de luz diária do sol) com 4 qualidades de luz de LEDs branca, azul, vermelha e RBW. 17
- Figura 3:** Figura 3: Caracterização da qualidade espectral da luz, nas cabines com luz de LEDs RBW (A), branca (B), azul (C) e vermelha (D). Imagem do acervo pessoal. 18
- Figura 4:** Índices de Clorofila a (Cl_a, A), clorofila b (Cl_b, B), clorofilas totais (Cl_{Total}, C) e razão entre clorofila a e clorofila b (Cl_a/Cl_b, D) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 22
- Figura 5:** Fluorescência mínima (F₀), rendimento quântico máximo do fotossistema II (ϕP_o), rendimento quântico no transporte de elétrons (ϕE_o) e o rendimento quântico de dissipação de energia na forma de calor (ϕD_o) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 30
- Figura 6:** Índice de desempenho fotoquímico (PiABS, A), índice de absorção de energia por centro de reação (ABS/RC, B) e fluxo de dissipação de energia na forma de calor por centro de reação (Dio/RC, C) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 31
- Figura 7:** Taxa fotossintética (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (C_i) e taxa transpiratória (E) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 38
- Figura 8:** Eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência de carboxilação (A/C_i) e respiração noturna (R_n) de plantas de morango

cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 39

Figura 9: Análise de componentes principais dos parâmetros de trocas gasosas, fluorescência da clorofila a, pigmentos cloroplastídicos e medidas de crescimento: Taxa fotossintética (*A*); condutância estomática (*g_{sw}*); taxa transpiratória (*E_{mmol}*); concentração interna de CO₂ (*C_i*); respiração noturna (*R_n*); eficiência do intrínseco da água (*A.g_s*); eficiência instantânea do uso da água (*A.E*); eficiência de carboxilação (*A.C_i*); fluorescência mínima (*F_o*); fluorescência máxima (*F_m*); rendimento quântico máximo do fotossistema II (*F_v/F_m*); movimento da excitação da energia aprisionada dos elétrons para cadeia de transporte de elétrons além da QA (*Ψ₀*); rendimento quântico do transporte de elétrons (*ΦE_o*); rendimento quântico máximo do fotossistema II (*Φ_i-P_o*); rendimento quântico da dissipação de energia (*ΦDO*); índice de desempenho fotoquímico (*PIABS*); absorção por centro de reação (*ABS/RC*); fluxo de dissipação de energia por centro de reação (*Dio/RC*); taxa máxima de excitação aprisionada por centro de reação (*TR₀/RC*); transferência máxima de elétrons entre PS II e PS I por centro de reação (*ET₀/RC*); clorofila a (*Cl_a*); clorofila b (*Cl_b*); clorofila totais (*Cl_{totais}*); razão entre clorofila a e b (*Cl_a.Cl_b*); parte aérea; números de folhas; espessura das folhas; diâmetro do colmo e raiz de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) e sob qualidades espectrais de luz de LEDs em regime de iluminação de LEDs constante e senoidal..... 42

Figura 10: Atividade antioxidante da enzima superóxido dismutase (SOD, A) e atividade antioxidante da enzima Ascorbato peroxidase (APX, B) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias..... 43

Figura 11: Atividade antioxidante da enzima catalase (CAT, A) e conteúdo de malonaldeído (MDA, B) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias..... 43

Figura 12: Diâmetro dos frutos (A) e números de frutos (B) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias..... 44

Figura 13: Peso total dos frutos (Kg, A-B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de

desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias..... 44

Figura 14: Luminosidade (L^* , A) e coordenada amarelo/azul (b^* , B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias..... 45

Figura 15: Coordenada vermelho/verde (a^* , A-B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 45

Figura 16: Teor de compostos fenólicos totais (A) e teor de flavonoides (B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias. 46

Figura 17: Teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias..... 46

Figura 18: Análise de componentes principais da atividade de enzimas antioxidantes de defesa (SOD, CAT e APX) e do conteúdo de malonaldeído (MDA), e das variáveis de análise de frutos (pH, acidez, $^{\circ}$ Brix, flavonoides e fenólicos): Ascorbato peroxidase (APX); catalase (CAT); superóxido dismutase (SOD); malonaldeído (MDA); Acidez; teor de sólidos solúveis ($^{\circ}$ Brix); potencial hidrogênico (pH), fenólicos totais e flavonoides totais de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob qualidades espectrais de luz de LEDs em regime de iluminação de LEDs constante e senoidal..... 48

LISTA DE SIGLAS, ABREVIACOES E UNIDADES DE MEDIDA

$\mu\text{g g}$ – Micrograma por grama	g planta^{-1} – Grama por planta
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ – Micromol por metro quadrado por segundo	gs – Condutância estomática
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ – Micromol por metro quadrado por segundo pascal	L^* - Luminosidade
$\mu\text{mol}/\text{min}-1\text{mg}-1$ proteína – Micromol por minuto em miligrama de proteína	LEDs – Diodos emissores de luz
A – Taxa fotossintética	MDA – Malonaldeído
a^* - coordenada vermelho/verde	mg g^{-1} – Miligrama por grama
A/Ci - Eficiência de carboxilação	mm – milímetro
A/gs - Eficiência intrínseca do uso da água	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ – Milimol por metro quadrado por segundo
ABS/RC - Absorção de energia por centro de reação	mmol/g de MF – Milimol por grama de matéria fresca
APX – Ascrobato peroxidase	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ – Mol de água por metro quadrado por segundo
AVU – Agricultura vertical urbana	nm – Nanômetro
b^* - coordenada amarelo/azul	$^\circ\text{Brix}$ – Teor de sólidos solúveis
CAT – Catalase	pH – Potencial Hidrogeniônico
Ci – Concentração interna de CO_2	PI_{ABS} - Índice de desempenho fotoquímico
Cl_a - Índices de clorofila a	RBW – Vermelho, Azul e Branco
Cl_a/Cl_b - Razão entre a clorofila a e b	Rn – Respiração noturna
Cl_b – Índice de clorofila b	SOD – Superóxido dismutase
CIT_{Totais} – Índice de clorofila total	U min-1 mg-1 de proteína – Unidade em minuto de miligrama de proteína
cm – centímetro	un – unidade
CO_2 – Dióxido de carbono	UV-A – Ultravioleta A
Dio/RC - Fluxo de dissipação de energia por centro de reação	ϕ_{DO} - Rendimento quântico de dissipação de energia
DLI - Integral diária de luz	ϕ_{Eo} - rendimento quântico de transporte de elétrons
E – Taxa transpiratória	
EUA – Eficiência do uso da água	
F0 - fluorescência mínima	
Fv/Fm – Eficiência quanta máxima fotossistema II	

Composição espectral e regime da iluminação artificial na qualidade e produtividade do morangueiro em ambiente controlado

RESUMO

A demanda alimentar e o aumento populacional têm exigido um conjunto de ações que devem ser tomadas a fim de garantir a segurança alimentar e a qualidade nutricional dos alimentos. O uso de sistemas de produção de alimentos mais resilientes às mudanças ambientais e sustentáveis, como a agricultura vertical aeropônica, surge como uma alternativa. Entretanto, é importante conhecer os mecanismos de modulação da qualidade e da quantidade de luz nesse sistema, a fim de otimizar a utilização de energia, o crescimento e o metabolismo de plantas. Neste estudo, plantas de morango foram cultivadas em agricultura vertical aeropônica, e foram avaliados os efeitos da qualidade espectral da luz de LEDs (selecionados na região do azul e vermelho e combinados) e do regime de iluminação (constante e senoidal) no desempenho das trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, na atividade de enzimas antioxidantes de defesa, estresse oxidativo, e nos parâmetros biométricos e de produtividade, bem como na produção de metabólitos secundários nos frutos. Foi observado, que independente do regime de iluminação e da qualidade de luz de LEDs, durante os estádios de desenvolvimento das plantas a regulação fotossintética e de pigmentos cloroplastídicos é necessária para melhorar a capacidade de absorção de energia, desempenho fotoquímico, estabelecimento das plantas (florescimento) e a maior eficiência no uso da água durante a frutificação. No entanto, a maior produção de frutos por planta foi observada sob LEDs azul e sob regime de iluminação constante. Apesar dos ajustes fisiológicos, as atividades de superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) foram positivamente reguladas sob as plantas cultivadas em LEDs vermelhas. Enquanto, nos frutos o teor de sólidos solúveis foi maior sob LEDs brancas, e os teores de compostos fenólicos e flavonóis foram fotomodulados pelas LEDs RBW e azul respectivamente. Os resultados obtidos indicam que, entre os diferentes tratamentos de luz avaliados, a utilização da luz azul demonstrou ser a mais promissora em termos de aumento de produtividade e da capacidade antioxidante dos frutos de morango cultivados em sistemas de agricultura vertical.

Palavras-chave: Aeroponia, *Fragaria x ananassa.*, alimentos nutracêuticos, flutuação de luz, fazendas urbanas.

Spectral composition and artificial lighting regime on the quality and productivity of strawberry in a controlled environment

ABSTRACT

The food demand and population growth have required a set of actions that must be taken to guarantee food safety and nutritional quality. The use of more resilient food production systems to environmental and sustainable changes, such as aeroponic vertical farming, emerges as an alternative. However, it is important to know the modulation mechanisms of quality and quantity of light in this system, to optimize the energy use, growth, and metabolism of plants. In this study, strawberry plants were cultivated in aeroponic vertical farming, and the effects of the spectral quality of the LEDs light (selected in the blue and red region and combined) and the lighting regime (constant and sinusoidal) on the performance of the gases exchanges, chlorophyll a fluorescence, the activity of defense antioxidant enzymes, oxidative stress, and biometric and productivity parameters, as well as the production of secondary metabolites in the fruits were evaluated. It was observed that, regardless of the lighting regime and light quality of LEDs, during plant development stages, photosynthetic and chloroplast pigment regulation is necessary to improve energy absorption capacity, photochemical performance, plant establishment (flowering) and greater efficiency in water use during fruiting. However, the highest fruit production per plant was observed under blue LEDs and under constant lighting regime. Despite physiological adjustments, superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) activities were upregulated under plants grown under red LEDs. While, in fruits, the soluble solids content was higher under white LEDs, and the contents of phenolic compounds and flavonols were photomodulated by RBW and blue LEDs, respectively. The results indicate that, among the different light treatments evaluated, the use of blue light proved to be the most promising in terms of increasing productivity and antioxidant capacity of strawberry fruits grown in vertical farming systems.

Keywords: Aeroponics, *Fragaria x ananassa.*, nutraceutical foods, light fluctuation, urban farms.

INTRODUÇÃO

A demanda global crescente por alimentos impõe o desafio de conciliar a segurança alimentar e a produção agrícola sustentável. Na agricultura vertical urbana (AVU) surge como modelo que pode auxiliar na melhora da disponibilidade de alimentos locais saudáveis (Birkby, 2016; Chance *et al.*, 2018). A agricultura vertical é uma forma de AAE (Agricultura em ambiente controlado), que economiza recursos (nutrientes, água e solo) e ao mesmo tempo que oferece alimentos de maior valor nutricional (Beacham *et al.*, 2019). Além disso, a prática da AVU está associada a redução na emissão de gases poluentes no ambiente como emissão de CO₂, que são comuns em produções convencionais, desde a colheita no campo até a geladeira do consumidor, com menor impacto ambiental (Rayhana *et al.*, 2020).

No ambiente de AVU, a luz proveniente da iluminação artificial por diodos emissores de luz (LEDs) é o principal fator ambiental controlado, responsável pela regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas. As plantas percebem a luz através de proteínas fotorreceptoras, que interagem com diferentes comprimentos de ondas como os fitocromos (luz vermelha 660–731 nm), os criptocromos e as fototropinas (região da luz azul /ultravioleta-A e B (UV-A/ UV-B) do espectro, 320–500 nm), os quais utilizam a luz nos processos fotomorfogênicos, ao mesmo tempo que fotomodulam vias metabólicas (Wang *et al.*, 2020). Além da qualidade de luz, a intensidade luminosa, também, é fator importante na modulação da fisiologia vegetal, quando associadas, intensidade e qualidade, diversos processos fisiológicos relacionados ao crescimento vegetal e reações fotoquímicas que convertem CO₂ em carboidratos, considerado fator chave na regulação na biossíntese das plantas (Ahmed *et al.*, 2020). Bian *et al.*, (2018) mostraram que sob associação de LED azul/vermelho, 1:1 e intensidade luminosa de 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, foram encontrados níveis mais elevados de ácido ascórbico de 5.65 mg g⁻¹ em folhas de alface (Bian *et al.*, 2018). O controle da iluminação artificial apropriada (fotoperíodo, intensidade e qualidade de luz) no ambiente *indoor*, permite melhorar o perfil morfológico, fisiológico e produtivo de plantas, além de promover maior síntese de compostos bioativos, agregando valor aos produtos de consumo (Paradiso & Proietti, 2022).

O morango, por exemplo, é uma espécie hortícola amplamente cultivado no mundo por seu sabor, textura e por conter níveis consideráveis de bioativos como os compostos fenólicos, flavonoides, vitaminas B e C e ácidos orgânicos com atividade antioxidante (Miller *et al.*, 2019). A complexidade do perfil metabólico no morango

apesar de ser bem apreciado e comprovado, é dependente do tipo de cultivo e das condições de manejo. O cultivo desta hortícola em agricultura vertical utilizando quantidade e qualidades espectrais de luz específica pode melhorar o desenvolvimento das plantas em função da melhor performance das taxas fotossintéticas (Blom *et al.*, 2022) e induzir vias de sinalização específicas que podem antecipar o ciclo de produção e melhorar a qualidade dos frutos (Shao *et al.*, 2021). Diversos estudos foram realizados para explorar o efeito de diferentes espectros de luz na fotomodulação de funções fisiológicas em plantas, a fim de aumentar a produtividade. Por exemplo, Zheng *et al.* (2019), reportaram que o uso de luz de LEDs azul estimulou a condutância estomática e o ganho de biomassa em raiz de rabanete, ao mesmo tempo que neste mesmo estudo houve o aumento no conteúdo de clorofila e açúcares solúveis em frutos de morango. Em contrapartida, em microtomateiro cultivado sob LEDs RBW (termo do inglês red, blue and white), maiores taxas fotossintéticas e menor condutância estomática refletiram em melhor eficiência no uso da água (EUA). O aumento na EUA e a manutenção nas taxas fotossintéticas é uma resposta importante para menor perda possível de água pela transpiração, e otimiza o crescimento, tornando as plantas mais produtivas (Baroli *et al.*, 2008). Já a maior uniformidade no crescimento de plantas de pepino e aumento no conteúdo da enzima Rubisco foram observados sob luz de LEDs RBW (Kochetova *et al.*, 2022). A utilização de luz vermelha e azul 1:1 e isoladas, promoveram incrementos na eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m), nos índices de clorofila, flavonoides e no balanço de nitrogênio (Viršilė *et al.*, 2020).

Além das fotomodulações fisiológicas, a capacidade da qualidade espectral da luz modificar o metabolismo antioxidante em plantas e/ou frutos também é uma característica desejável para o cultivo em agricultura vertical. O cultivo de alface e mostarda sob luz de LEDs azul, por exemplo, aumentou os teores de antocianinas, carotenoides e ácido ascórbico (Paradiso & Proietti, 2022). Já sob LEDs vermelhos, aumento nos teores de licopeno e β -caroteno foram observados em frutos de tomate (Ngcobo *et al.*, 2020). Enquanto, em manjeriço verde expostas sob a mesma qualidade de luz houve aumento no conteúdo de compostos fenólicos, flavonóis e antocianinas (Lobiuc *et al.*, 2017). Os teores de ácido clorogênico, também foram positivamente regulados em frutos de morangos cultivados sob LEDs azuis, em comparação com a luz vermelha e branca. Outros estudos como abordado por Jung *et al.*, (2021) revelam que os efeitos do regime da luz de LED são capazes de induzir com respostas fotoespecíficas na produção como melhor desempenho da qualidade nutricional e

concentração como de amido, proteínas, vitaminas, açúcares simples e compostos bioativos. A aplicação de luz branca em alface, por exemplo, induziu maior concentração de vitamina C, acúmulo de açúcares, teor de clorofila *a* e *b* e fotossíntese líquida (Yan *et al.*, 2020; Nájera *et al.*, 2022), enquanto em *Brosimum gaudichaudii* Trécul, cultivado *in vitro* sob LED branco, os níveis de flavonoides foram mais expressivos (Costa *et al.*, 2021).

Ainda que as plantas apresentem respostas específicas frente as qualidades de luz, estudos criando condições dinâmicas de intensidade luminosa (regime senoidal), mas mantendo a integral diária de luz (DLI, *Daily Light Integral*) de cada componente espectral ainda são incipientes. Chiang *et al.* (2020), por exemplo, observaram que plantas de alface e *Ocimum* cultivadas sob regime de luz senoidal de amplo espectro (branco) apresentaram maior área foliar, quando comparadas ao cultivo sob luz constante e com luz natural, ainda neste mesmo estudo, o conteúdo de clorofila presente nas folhas foi menor sob iluminação constante. Por outro lado, Vinyard (2023) evidenciou que o cultivo de soja e milho sob flutuação de luz diminuiu o rendimento de interesse agrônomo, similar ao observado em cultivares de arroz (Zhu *et al.*, 2004) . Enquanto em plantas de *Arabidopsis* o acúmulo de sacarose e amido foi mais evidente em sob luz senoidal em relação a luz natural (Annunziata *et al.*, 2017).

Com base nesses estudos que descreveram os efeitos de qualidade e da intensidade de luz no crescimento, na fisiologia e na produção de compostos bioativos em diferentes plantas, examinaram se as qualidades de luz de LEDs (Branca, RBW, azul e vermelha) em regime de iluminação constante e/ou senoidal em sistema de agricultura vertical aeropônica induz melhoria no desempenho fisiológico e bioquímico de plantas de morango, bem como na produtividade e na produção de compostos bioativos nos frutos. Propõe-se neste estudo investigar se o regime de fornecimento (constante e senoidal), bem como as diferentes qualidades de luz antecipam o ciclo reprodutivo do morangueiro, aumentam a capacidade antioxidante e as propriedades nutricionais dos frutos, e quais mecanismos fisiológicos estão envolvidos nestas fotomodulações.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal e condições de crescimento

O experimento foi conduzido em ambiente *indoor* de agricultura vertical, com umidade relativa de ~65% e temperatura $25^{\circ}\text{C} \pm 2$ no Complexo de Laboratórios de Biotecnologia Vegetal do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. As plântulas de morango variedade *Albion* provenientes de cultivo convencional em casa de vegetação, foram selecionadas a partir da padronização da altura e transplantadas individualmente para cabines isoladas com sistema de aeroponia, regime de irrigação de PVC de 150 mm e as raízes das plantas recebiam nebulização em período de 12h (07h00 às 19h00), 2 minutos de nebulização a cada 5 minutos, com solução nutritiva a base de um mix com macro e micronutrientes (*PlantPar – Fertilizantes de Precisão* (Flex 1 e 2 no estágio de vegetativo e florescimento Produção 1 e 2 frutificação)). Adicionalmente um fluxo de 2 minutos era ativado às 03h00, para evitar desidratação. As mudas foram distribuídas em perfurações de suportes de PVC, sob espaçamento de 0,3 m entre suporte e 0,2 m entre cada poço por suporte.

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso em esquema fatorial 4x2, sendo 4 qualidades de luz proporcionadas por LEDs: luz branca, azul, vermelha e RBW (termo do inglês *red, blue and white*) e 2 regimes de iluminação: intensidade constante e senoidal.

No ambiente *indoor* foram montadas oito cabines isoladas com dimensões de 2,00 x 0,75m, comprimento e largura, respectivamente, e altura ajustável conforme o crescimento das plantas (Figura 1). Para cada regime de iluminação (constante e senoidal) (Figura 2), foram utilizadas quatro cabines, cada uma com diferentes qualidades espectrais da luz branca fria (controle – amplo espectro), azul, vermelha e RBW (Figura 3). Os picos de comprimentos de onda emitidos pelos LEDs vermelhos e azuis foram de 660 nm e 450 nm, respectivamente. No regime de iluminação constante, as plantas foram cultivadas sob intensidade luminosa de $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ com fotoperíodo de 12 horas. No senoidal, as plantas foram cultivadas no mesmo fotoperíodo, entretanto, sob flutuação da intensidade de luz de LEDs. Os tratamentos com luzes senoidais tiveram suas intensidades flutuando de $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (7 h) até seu ponto de saturação $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ao longo das 12h de luz (Figuras 2-3). A programação da intensidade luminosa foi realizada através do software Inventronics Multi-Programmer (Inventronics, Oklahoma, USA). Em ambos os regimes de iluminação, a DLI (*Daily Light Integral*, luz diária integral) foi de $15,12 \text{ mol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A intensidade de luz e a composição do espectro foram aferidas com espectrômetro modelo LI-180 (Li-Cor, NE, USA) conforme figura 3B.



Figura 1: Plantas de morango cultivadas em agricultura vertical aeropônica em cabines isoladas com diferentes qualidades espectrais de luzes de LEDs, monocromáticas vermelha e azul e combinadas branca e RBW. Imagem do acervo pessoal.

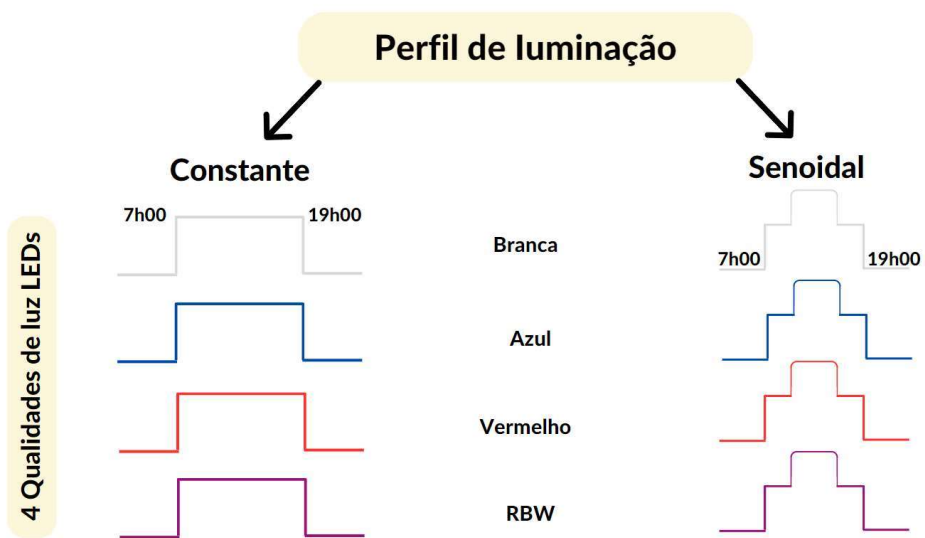


Figura 2: Esquematização do delineamento experimental, com 2 regimes de iluminação (constante e senoidal que simula a curva de luz diária do sol) com 4 qualidades de luz de LEDs branca, azul, vermelha e RBW.

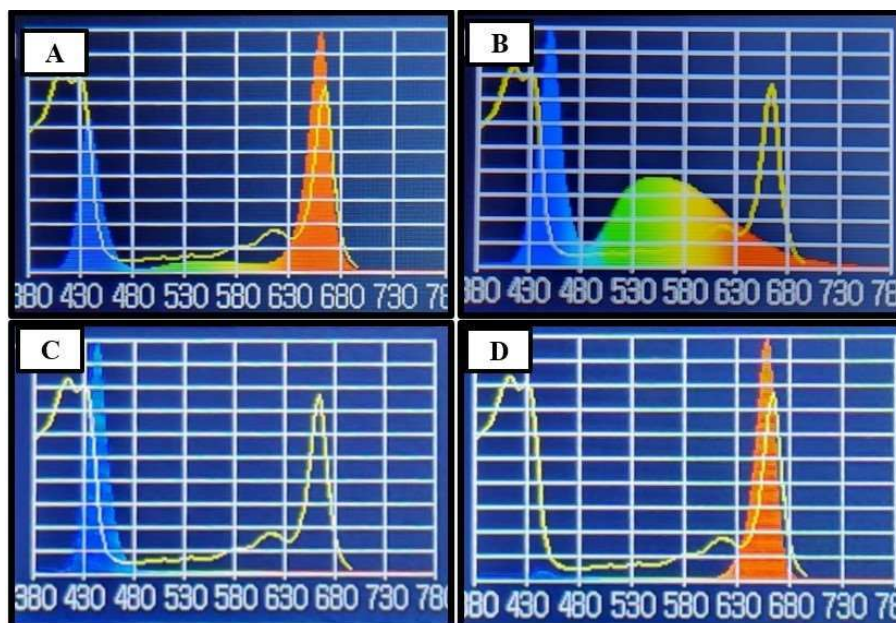


Figura 3: Figura 3: Caracterização da qualidade espectral da luz, nas cabines com luz de LEDs RBW (A), branca (B), azul (C) e vermelha (D). Imagem do acervo pessoal.

Nos regimes de iluminação, as plantas foram cultivadas por um período de 30 dias e realizadas as avaliações descritas a seguir.

2.2 Variáveis avaliadas

2.2.1 Avaliações fisiológicas e pigmentos cloroplastídicos

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas em seis repetições por qualidade de luz para registro da taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa transpiratória (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 (C_i). A partir desses dados foi possível calcular a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) e a eficiência de carboxilação (A/C_i , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) (Machado *et al.*, 2005). As medições foram realizadas utilizando um analisador de gases por infravermelho (LI-6800 XT, Li-Cor[®], NE, USA). As variáveis de fluorescência da clorofila foram avaliadas utilizando o fluorômetro FluorPen FP 110/D (Photon Systems Instrumentes, Czech Republic), nas mesmas plantas em que foram realizadas as medições de trocas gasosas. Foram obtidas a fluorescência mínima (F_o), rendimento quântico máximo do fotossistema II (ϕP_o), rendimento quântico de transporte de elétrons (ϕE_o), índice de desempenho fotoquímico (PI_{ABS}), absorção de energia por centro de reação (ABS/RC), rendimento quântico de dissipação de energia (ϕDo) e o fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC). Os índices de clorofila a (Cl_a), clorofila b (Cl_b),

clorofila total (*Cl_t*) e razão entre a clorofila *a* e *b* (*Cl_a/Cl_b*) foram obtidos utilizando o clorofilômetro ClorofiLog CFL 1030, (Falker, RS, Brasil) em folhas totalmente expandidas.

2.2.2 Análises biométricas

As plantas foram mensuradas para a determinação das seguintes variáveis biométricas: Número de folhas (NF, un), espessura da folha (EF, mm), altura da parte aérea (PA, cm), comprimento de raiz (R, cm), números de frutos (NFr, un), peso dos frutos (PFr, g), tamanho dos frutos (AFr, mm) e espessura dos frutos (EFr, mm). Para as medições foram utilizados paquímetro manual, balança analítica e régua graduada.

2.2.3 Acidez titulável e teor de sólidos solúveis dos frutos

Para acidez titulável os frutos foram macerados, adicionando-se 10 mL de água deionizada a cada 1 grama de fruto, em seguida a mistura foi filtrada em gaze para retirada da fase sólida, e adicionado 5 gotas do indicador ácido-base, fenolftaleína, sendo posteriormente titulada com hidróxido de sódio padronizado (1 M) até o ponto de viragem. Na determinação do teor de sólidos solúveis totais, os frutos foram macerados para retirada do suco e gotejados sobre o prisma do refratômetro manual (BHB-32ATC, Vodex).

2.2.4 Determinação do teor fenólicos totais e flavonoides totais

A determinação de fenólicos totais em frutos de morango foi determinado utilizando o reagente de Folin-Ciocalteu com ácido gálico como padrão, e a absorbância a 760 nm em espectrofotômetro de UV-visível foi medida após 60 min de reação à temperatura ambiente no escuro (Gontijo *et al.*, 2017). Em tubos de ensaio foram adicionados, respectivamente, os reagentes de Folin-Ciocalteu (0,5 mL), carbonato de sódio aquoso (Na₂CO₃) a 15% (1,0 mL) e água ultrapura (MilliQ) (7,5 mL) e ao fim adicionados a solução de frutos de morango (1 mL). Os resultados foram expressos em µg mL⁻¹ de equivalente de ácido gálico (EAG)/mg em frutos de morangos. Os flavonoides totais foram quantificados pelo método AlCl₃ com quercetina como composto padrão, e a absorbância a 420 nm foi medida em um espectrofotômetro UV-Visível após 30 minutos de reação à temperatura ambiente no escuro (Lamaison & Carnet, 1990; Gontijo *et al.*, 2017). Para a leitura foram adicionados em tubo de ensaio

0,2 mL de ácido acético (CH₃COOH), 6,8 mL de metanol, 2,5 mL de cloreto de alumínio (AlCl₃ 6H₂O) 8% e, por fim foram adicionados a 2 mL de solução de frutos de morangos. Os resultados foram expressos em µg mL⁻¹ de equivalentes de quercetina (EQ)/mg em frutos de morango.

2.2.5 Análise da atividade de enzimas antioxidantes e conteúdo de estresse oxidativo

A determinação da atividade da dismutase do superóxido (SOD), da catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX), foram coletados e macerados aproximadamente 0,3 g de tecido foliar em almofariz com nitrogênio líquido contendo 2mL do seguinte meio de extração: tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 6,8), ácido etilenodiaminotetracético (EDTA, 0,1 mM), fluoreto de fenilmetilsufônico (PMSF, 1 mM) e polivinilpirrolidona (PVP, 2%). O conteúdo enzimático foi centrifugado a 12000 rpm durante 15 min a 4°C. O sobrenadante foi utilizado em triplicata como extrato bruto. A atividade da SOD foi determinada a partir da metodologia proposta por (Longo *et al.*, 1993). A mistura de reação consistiu em tampão fosfato de potássio (50 mM, pH 7,8), metionina (13 mM), NBT (0,075 mM), EDTA (0,1 mM) e riboflavina (0,002 mM). A reação foi iniciada após a adição 50 µL do conteúdo enzimático em 1,95 mL da mistura da reação. A reação ocorreu a 25°C sob exposição de uma lâmpada de 15 W. Depois de 10 min de exposição luminosa, a seguir o resultado da fotoredução do NBT, a produção de formazana azul, a leitura foi determinada a 560 nm em espectrofotômetro (Evolution 60S, Thermo Fisher Scientific Inc., MA, EUA) de acordo com (Giannopolitis & Ries, 1977). A atividade da CAT foi determinada pela velocidade da degradação de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) a 240 nm durante 3 min a 25°C (Havir & Mchale, 1987), adaptada. A reação foi iniciada após adição de 10 µL do extrato bruto enzimático em 990 µL do meio de reação contendo tampão de fosfato de potássio (25 mM, pH 7,0) e H₂O₂ (2,5 mM). Para atividade da APX foi utilizada a metodologia proposta por Nakano & Asada (1981). A reação foi iniciada após a adição de 50 µl do extrato enzimático bruto em 1,95 ml do meio de reação contendo tampão de fosfato de potássio (50 mM, pH 6,0), H₂O₂ (1 mM) e ascorbato (0,8 mM). A atividade da APX foi medida pela taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm durante um minuto a 25°C.

O conteúdo de malonaldeído (MDA) foi determinado utilizando o método proposto por (Heath & Packer, 1968). Foram maceradas aproximadamente 160 mg de folhas frescas em almofariz congelado com solução de extração de 2mL de TCA 0,1%. O extrato foi centrifugado a 12000 rpm, durante 15 minutos a 4°C e, posteriormente, 500 µL do sobrenadante foi adicionado a 1,5mL da solução TBA 0,5% + TCA 20% (p/v) e aquecidos em estufa a 90°C, em tubos hermeticamente fechados, por 20 minutos. A reação foi paralisada em banho de gelo por um minuto, posteriormente foi centrifugado a 3000 rpm por 4 minutos e as leituras realizadas em espectrofotômetro UV-VIS (modelo Evolution 60S, Thermo Fisher Scientific, Madison, EUA), a 440, 532 e 600 nm. Os dados de TBARS foram expressos em nmol TBA-MDA g⁻¹ MF.

2.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram analisados inicialmente para verificar a distribuição normal, e posteriormente, submetidos à análise de variância (ANOVA), sendo as diferenças entre as médias testadas pelo teste de Tukey a nível de significância de 5% ($p < 0,05$), utilizando a plataforma RStudio. Os gráficos foram obtidos utilizando o software RStudio e Sigmaplot 11.0. A PCA foi realizada para 5 qualidades de luz e matrizes de correlação de 33 variáveis de resposta. As análises foram realizadas usando o pacote R factoextra baseado no pacote ggplot2 (R Core Team, 2018), considerando os dois primeiros escores PC DIM1 e DIM2 representando a maior variação nos parâmetros do teste.

3. RESULTADOS

3.1. Variáveis fotossintéticos

O índice de clorofila *a* diferiu estatisticamente entre as fases de desenvolvimento do morango, enquanto, os índices de clorofila *b* (*Clb*), clorofilas totais e a razão *Cl*_a/*Cl*_b, apresentaram interação significativa entre os regimes de iluminação (constante e senoidal) e os estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação). Maiores valores de *Cl*_a foram obtidos durante o estágio de florescimento das plantas (Figura 4 A). Maiores índices de *Cl*_b foram observados nos estádios vegetativo e de florescimento sob regime constante, e no vegetativo sob regime senoidal (Figura 4 B).

Já para clorofilas totais verificou-se queda desses índices na frutificação em relação ao vegetativo e florescimento, em ambos os regimes de iluminação. Após a fase vegetativa, verificou-se aumento significativo da razão *Cla/Clb* em ambos os regimes (Figura 4 D).

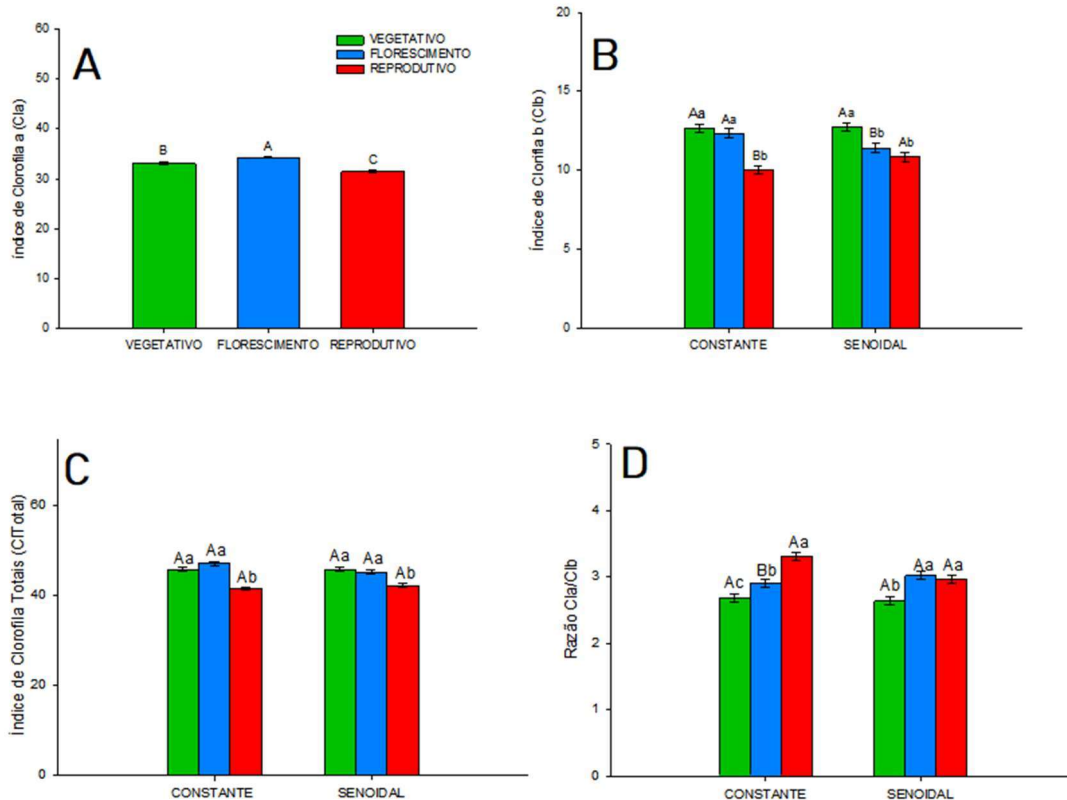


Figura 4: Índices de Clorofila a (Cla, A), clorofila b (Clb, B), clorofilas totais (CITotal, C) e razão entre clorofila a e clorofila b (Cla/Clb, D) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

As variáveis de fluorescência inicial (F_o), rendimento quântico máximo do fotossistema II (ϕP_o), índice de desempenho fotoquímico (PI_{ABS}), rendimento quântico de dissipação de energia na forma de calor (ϕDO), rendimento quântico do transporte de elétrons (ϕE_o), índice de absorção de energia por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia na forma de calor por centro de reação (Dio/RC) apresentaram interação tripla entre qualidade de luz, regime da iluminação de LED e os estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

A fluorescência inicial (F_o) apresentou valores maiores durante o estádio de florescimento, em compensação os valores de ϕP_o foram superiores durante este estádio de desenvolvimento, principalmente em plantas de morango cultivadas sob

regime de iluminação senoidal, apesar disso o PI_{ABS} teve valores maiores sob LEDs brancos em regime constante em estágio de florescimento. No estágio de florescimento foram observados rendimentos menores na dissipação de calor (φDo) e o rendimento quântico no transporte de elétrons (φEo) em qualidades de luzes LEDs sob iluminação constante, enquanto a absorção por centro de reação (ABS/RC) apresentaram valores maiores durante o florescimento, contudo o fluxo de dissipação de calor por centro de reação foi evidente no estágio vegetativo.

Tabela 1: Parâmetros de fluorescência da clorofila *a*: Fluorescência mínima (Fo); rendimento quântico máximo do fotossistema II (ϕPo); rendimento quântico do transporte de elétrons (ϕEo); rendimento quântico da dissipação de energia (ϕDo); índice de desempenho fotoquímico (PIABS); absorção por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).¹

		ESTÁDIO VEGETATIVO			
		VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA			
		-----Fo-----		----- ϕPo -----	
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ
	CONSTANTE	SENOIDAL	CONSTANTE	SENOIDAL	SENOIDAL
BRANCO	A 6765 a	A 4845 b	A 0,64 a	A 0,63 a	
RBW	A 4996 a	A 5203 ab	A 0,66 a	A 0,65 a	
AZUL	B 4525 a	A 6568 ab	A 0,66 a	A 0,68 a	
VERMELHO	B 5436 a	A 7618 a	A 0,65 a	A 0,61 a	
MÉDIA REGIME	5431 B	6059 A	0,65 A	0,64 B	
		----- ϕEo -----			
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ	REGIME DE LUZ
	CONSTANTE	SENOIDAL	CONSTANTE	SENOIDAL	SENOIDAL
BRANCO	A 325 a	A 280 a	A 359 a	A 375 a	
RBW	A 333 a	A 333 a	A 344 a	A 354 a	
AZUL	A 362 a	A 312 a	A 337 a	A 324 a	
VERMELHO	A 352 a	B 231 a	A 349 a	A 388 a	
MÉDIA REGIME	343 A	289 B	347 B	360 A	

¹ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). \pm Erro padrão.

Tabela 1: Parâmetros de fluorescência da clorofila *a*: Fluorescência mínima (Fo), rendimento quântico máximo do fotossistema II (ΦPo); rendimento quântico do transporte de elétrons (ΦEo); rendimento quântico da dissipação de energia (ΦDO); índice de desempenho fotoquímico (PIABS); absorção por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO VEGETATIVO			
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA			
QUALIDADE DE LUZ	PIABS		ABS/RC
	REGIME DE LUZ	SENODIAL	REGIME DE LUZ
BRANCO	CONSTANTE	A 962 ab	CONSTANTE
		A 1390 a	A 2281 ab
RBW		A 1185 a	A 2038 a
		A 2226 a	A 2190 ab
AZUL		A 1376 a	A 2119 a
		A 1052 ab	A 2090 b
VERMELHO		A 1574 a	B 2161 a
		A 428 c	A 2570 a
MÉDIA REGIME		A 1381	B 2207
		B 1167	A 2283

ESTÁDIO DE FRUTIFICAÇÃO			
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA			
QUALIDADE DE LUZ	Dio/RC		SENODIAL
	REGIME DE LUZ	CONSTANTE	REGIME DE LUZ
BRANCO	CONSTANTE	A 2510 a	CONSTANTE
		A 2281 ab	A 2281 ab
RBW		A 2038 a	A 2190 ab
		A 2119 a	A 2090 b
AZUL		B 2161 a	A 2570 a
		B 2207	A 2283

2

2 Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Tabela 1: Parâmetros de fluorescência da clorofila α : Fluorescência mínima (Fo); rendimento quântico máximo do fotossistema II (Phi-Po); rendimento quântico do transporte de elétrons (ΦEo); rendimento quântico da dissipação de energia (ΦDo); índice de desempenho fotoquímico (PIABS); absorção por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FLORESCIMENTO					
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA					
-----Fo-----			----- ΦPo -----		
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ	SENoidal	REGIME DE LUZ	SENoidal	SENoidal
	CONSTANTE		CONSTANTE		
BRANCO	A 11807 ab	A 11200 ab	A 805 a	A 794 a	
RBW	A 9856 b	A 10664 b	A 798 a	A 785 a	
AZUL	A 9769 b	A 10366 b	A 795 a	A 791 a	
VERMELHO	A 12717 a	A 13676 a	A 730 a	A 671 b	
MÉDIA REGIME	B 11037	A 11477	A 782	B 760	
----- ΦEo -----					
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ	SENoidal	REGIME DE LUZ	SENoidal	SENoidal
	CONSTANTE		CONSTANTE		
BRANCO	A 432 ab	A 376 a	A 195 a	A 206 b	
RBW	A 455 ab	B 351 a	A 202 a	A 215 b	
AZUL	A 484 a	B 372 a	A 205 a	A 209 b	
VERMELHO	A 353 b	B 209 b	A 270 a	A 329 a	
MÉDIA REGIME	A 431	B 327	B 218	A 240	

3

³ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). \pm Erro padrão.

Tabela 1: Parâmetros de fluorescência da clorofila *a*: Fluorescência mínima (Fo); rendimento quântico máximo do fotossistema II (Phi-Po); rendimento quântico do transporte de elétrons (ΦEo); rendimento quântico da dissipação de energia (ΦDO); índice de desempenho fotoquímico (PIABS); absorção por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FLORESCIMENTO				
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA				
QUALIDADE DE LUZ	PIABS		ABS/RC	
	REGIME DE LUZ	SENoidal	REGIME DE LUZ	SENoidal
BRANCO	CONSTANTE A 2122 ab	A 1676 a	CONSTANTE A 2387 ab	A 2269 b
RBW	A 2582 ab	A 1376 a	A 2203 b	A 2220 b
AZUL	A 3050 a	B 1700 a	A 2088 b	A 2065 b
VERMELHO	A 1141 b	A 361 a	A 2757 a	A 3041 a
MÉDIA REGIME				

ESTÁDIO FLORESCIMENTO				
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA				
QUALIDADE DE LUZ	Dio/RC		SENoidal	
	REGIME DE LUZ	CONSTANTE	REGIME DE LUZ	SENoidal
BRANCO	A 468 a	A 473 b		
RBW	A 447 a	A 478 b		
AZUL	A 429 a	A 433 b		
VERMELHO	A 758 a	A 1025 a		
MÉDIA REGIME	B 530	A 602		

4

⁴ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Tabela 1: Parâmetros de fluorescência da clorofila *a*: Fluorescência mínima (Fo); rendimento quântico máximo do fotossistema II (Phi-Po); rendimento quântico do transporte de elétrons (PhiEo); rendimento quântico da dissipação de energia (PhiDO); índice de desempenho fotoquímico (PIABS); absorção por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FRUTIFICAÇÃO				
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA				
QUALIDADE DE LUZ	Fo		PhiPo	
	REGIME DE LUZ	SENoidal	REGIME DE LUZ	SENoidal
BRANCO	CONSTANTE A 12061 b	A 10875 a	CONSTANTE B 703 b	A 809 a
RBW	A 18103 a	B 111622 a	A 754 ab	A 786 a
AZUL	A 11373 b	A 11861 a	A 787 a	A 759 a
VERMELHO	A 10252 b	A 10330 a	A 802 a	A 788 a
MÉDIA REGIME	A 1294	B 111172	B 762	A 786

ESTÁDIO FRUTIFICAÇÃO				
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA				
QUALIDADE DE LUZ	PhiEo		PhiDo	
	REGIME DE LUZ	SENoidal	REGIME DE LUZ	SENoidal
BRANCO	CONSTANTE B 230 b	A 384 a	CONSTANTE A 297 a	B 191 a
RBW	A 351 ab	A 346 a	A 246 ab	A 214 a
AZUL	A 340 ab	A 294 a	A 213 b	A 241 a
VERMELHO	A 386 a	A 346	A 198 b	A 212 a
MÉDIA REGIME	B 327	A 343	A 239	B 215

5

⁵ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Tabela 1: Parâmetros de fluorescência da clorofila *a*: Fluorescência mínima (Fo); rendimento quântico máximo do fotossistema II (Phi-Po); rendimento quântico do transporte de elétrons (ΦEo); rendimento quântico da dissipação de energia (ΦDO); índice de desempenho fotoquímico (PIABS); absorção por centro de reação (ABS/RC) e fluxo de dissipação de energia por centro de reação (Dio/RC) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FRUTIFICAÇÃO				
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA				
QUALIDADE DE LUZ	PIABS		ABS/RC	
	REGIME DE LUZ	SENoidal	REGIME DE LUZ	SENoidal
BRANCO	CONSTANTE	A 1884 a	CONSTANTE	B 2202 a
RBW	CONSTANTE	A 1291 a	CONSTANTE	B 2408 a
AZUL	CONSTANTE	A 897 a	CONSTANTE	A 2497 a
VERMELHO	CONSTANTE	A 1712 a	CONSTANTE	A 2152 a
MÉDIA REGIME		A 1446		B 2315

ESTÁDIO FRUTIFICAÇÃO				
VARIÁVEIS DE FLUORESCÊNCIA				
QUALIDADE DE LUZ	Dio/RC		SENoidal	
	REGIME DE LUZ	CONSTANTE	REGIME DE LUZ	SENoidal
BRANCO	CONSTANTE	A 804 a		A 421 a
RBW	CONSTANTE	A 827 a		A 517 a
AZUL	CONSTANTE	A 504 ab		A 610 a
VERMELHO	CONSTANTE	A 412 b		A 466 a
MÉDIA REGIME		A 637		B 504

6

⁶ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Para interação tripla das variáveis de fluorescência, observaram que durante o estágio de desenvolvimento de florescimento e de frutificação as variáveis F_0 , ϕ_{PO} , ϕ_{Eo} foram maiores (Figura 5 A-C), ao contrário do observado para a dissipação de energia foi menor ϕ_{Do} (Figura 5 D).

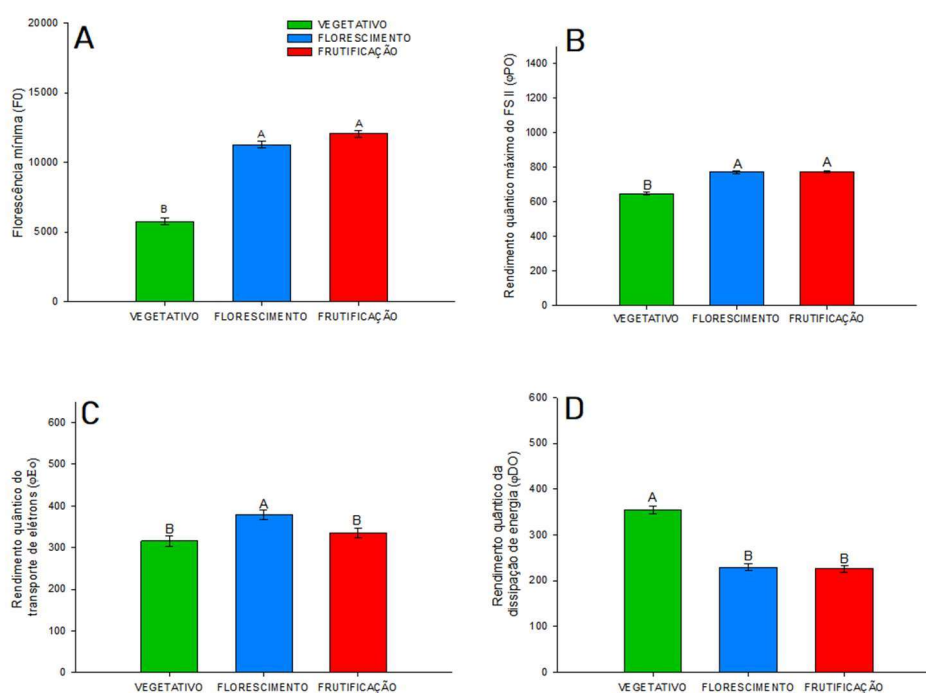


Figura 5: Fluorescência mínima (F_0), rendimento quântico máximo do fotossistema II (ϕ_{PO}), rendimento quântico no transporte de elétrons (ϕ_{Eo}) e o rendimento quântico de dissipação de energia na forma de calor (ϕ_{DO}) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

A interação tripla ainda demonstra que não houve diferenças significativas para Π_{ABS} , os estádios de desenvolvimento, entretanto valores maiores de ABS/C foram evidenciados durante a frutificação e de Dio/RC no estágio vegetativo (Figura 6 A-C).

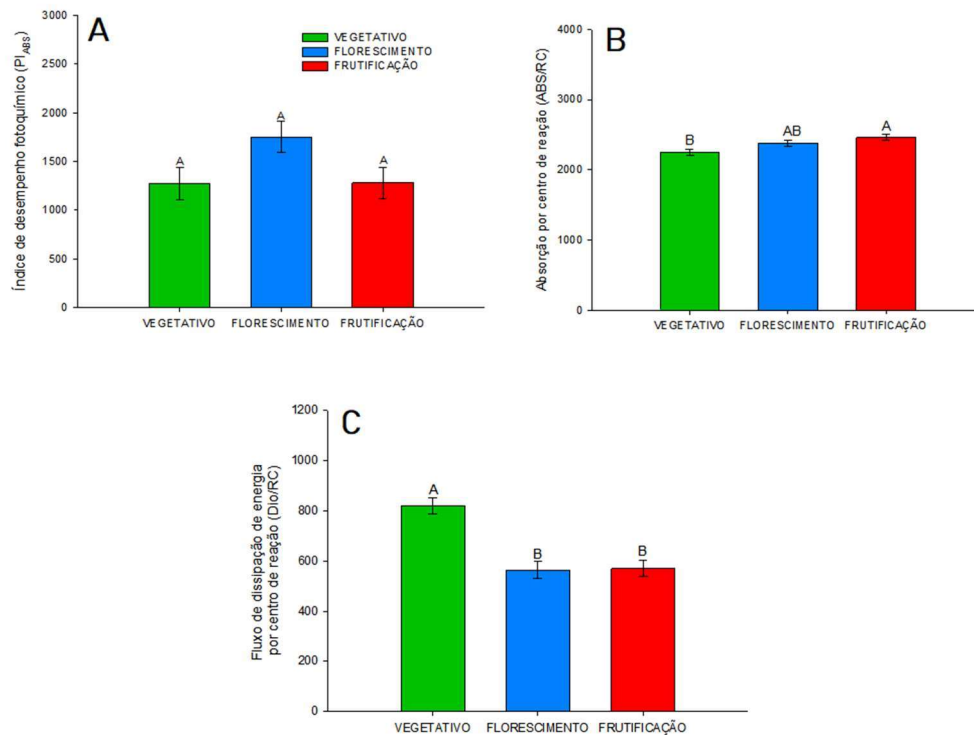


Figura 6: Índice de desempenho fotoquímico (Pi_{ABS}, A), índice de absorção de energia por centro de reação (ABS/RC, B) e fluxo de dissipação de energia na forma de calor por centro de reação (Dio/RC, C) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

As variáveis de trocas gasosas, taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), Concentração interna de CO_2 (C_i), taxa transpiratória (E), eficiência instantânea de uso da água (A/E), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), eficiência da carboxilação (A/C_i) e respiração noturna (R_n) apresentaram interação tripla entre qualidade de luz, regime da iluminação de luzes de LED e estágio de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

Durante a frutificação em plantas cultivadas sob iluminação senoidal diferiram significativamente com maiores valores em A . Enquanto isso, durante o estágio vegetativo a média observada em g_s foram estatisticamente maiores, conseqüentemente refletindo em E neste mesmo estágio de desenvolvimento, no entanto menor expressão

de C_i foi observada na frutificação das plantas de morango. As observações das razões, mostraram que durante estágio vegetativo a A/E foi menor, bem como na eficiência de A/gs . Na frutificação a fixação de carbono pela enzima Rubisco (A/C_i) foi mais eficiente, similarmente entre os regimes de iluminação e qualidades de luzes de LEDs, ao mesmo tempo que a respiração noturna (R_n) foi menor, principalmente sob cultivo senoidal.

Tabela 2: Desempenho das trocas gasosas: Taxa fotossintética (A); condutância estomática (gs); taxa transpiratória (E); concentração interna de CO₂ (Ci); eficiência instantânea do uso da água (A/E); eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s); eficiência de carboxilação (A/Ci) e respiração noturna (Rn) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO VEGETATIVO					
VARIÁVEIS DE TROCAS GASOSAS					
		$A (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		$gs (\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$	
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		SENODIAL
	CONSTANTE	SENODIAL	CONSTANTE	SENODIAL	
BRANCO	A 13,37 a	A 12,72 a	A 0,333 a	B 0,200 a	
RBW	A 15,43 a	A 13,35 a	A 0,383 a	B 0,283 a	
AZUL	A 14,85 a	A 14,22 a	A 0,333 a	A 0,283 a	
VERMELHO	A 14,88 a	A 13,13 a	A 0,317 a	B 0,217 a	
MÉDIA REGIME	A 14,63	B 13,36	A 0,342	B 0,246	
		$Ci (\mu\text{mol mol}^{-1})$		$E (\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1})$	
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		SENODIAL
	CONSTANTE	SENODIAL	CONSTANTE	SENODIAL	
BRANCO	A 303 a	B 263 a	A 5,500 a	B 3,633 a	
RBW	A 296 a	A 285 a	A 5,050 a	B 4,017 a	
AZUL	A 295 a	A 282 a	A 5,400 a	B 4,133 a	
VERMELHO	A 283 a	A 262 a	A 5,000 a	B 3,600 a	
MÉDIA REGIME	A 294	B 273	A 5,2375	B 3,8458	

7

7 Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Tabela 2: Desempenho das trocas gasosas: Taxa fotossintética (A); condutância estomática (gs); taxa transpiratória (E); concentração interna de CO₂ (Ci); eficiência instantânea do uso da água (A/E); eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s); eficiência de carboxilação (A/Ci) e respiração noturna (Rn) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO VEGETATIVO					
VARIÁVEIS DE TROCAS GASOSAS					
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		SENODIAL
	CONSTANTE	SENODIAL	CONSTANTE	SENODIAL	
-----A/E-----		-----A/g _s -----			
BRANCO	A 2,48 a	A 3,77 a	B 40,4 a	A 66,1 a	
RBW	A 3,10 a	A 3,53 a	A 43,5 a	A 52,7 a	
AZUL	A 2,80 a	A 3,60 a	A 44,3 a	A 53,8 a	
VERMELHO	A 3,10 a	A 3,97 a	A 51,2 a	A 67,0 a	
MÉDIA REGIME	B 2,87	A 3,72	B 44,85	A 59,9	
-----Rn-----					
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		SENODIAL
	CONSTANTE	SENODIAL	CONSTANTE	SENODIAL	
-----A/Ci-----		-----Rn-----			

8

⁸ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Tabela 2: Desempenho das trocas gasosas: Taxa fotossintética (A); condutância estomática (gs); taxa transpiratória (E); concentração interna de CO₂ (Ci); eficiência instantânea do uso da água (A/E); eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s); eficiência de carboxilação (A/Ci) e respiração noturna (Rn) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FLORESCIMENTO					
VARIÁVEIS DE TROCAS GASOSAS					
QUALIDADE DE LUZ	A ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		gs ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		SENODIAL
	REGIME DE LUZ	CONSTANTE	REGIME DE LUZ	SENODIAL	
BRANCO	B 11,78 a	A 14,83 a	A 0,183 a	B 0,317 a	
RBW	B 12,13 a	A 15,95 a	A 0,183 a	A 0,233 a	
AZUL	B 8,48 b	A 14,73 a	B 0,100 ab	A 0,300 a	
VERMELHO	B 6,82 b	A 14,18 a	B 0,050 b	A 0,233 a	
MÉDIAREGIME	B 9,80	A 14,92	B 0,129	A 0,271	

QUALIDADE DE LUZ	Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)		E ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		SENODIAL
	REGIME DE LUZ	CONSTANTE	REGIME DE LUZ	SENODIAL	
BRANCO	B 253 a	A 288 a	B 2,033 ab	A 3,167 a	
RBW	B 224 ab	A 261 a	A 2,067 a	A 1,933 b	
AZUL	B 236 a	A 292 a	B 1,300 ab	A 3,250 a	
VERMELHO	B 194 b	A 272 a	B 0,917 b	A 2,683 ab	
MÉDIA REGIME	B 227	A 278	B 1,579	A 2,758	

9

9 Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). \pm Erro padrão.

Tabela 2: Desempenho das trocas gasosas: Taxa fotossintética (A); condutância estomática (gs); taxa transpiratória (E); concentração interna de CO₂ (Ci); eficiência instantânea do uso da água (A/E); eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s); eficiência de carboxilação (A/Ci) e respiração noturna (Rn) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FLORESCIMENTO					
VARIÁVEIS DE TROCAS GASOSAS					
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		SENoidal
	CONSTANTE	SENoidal	CONSTANTE	SENoidal	
A/E		A/g _s			
BRANCO	A 6,12 a	A 4,80 b	A 75,9 b	B 51,2 a	
RBW	B 6,67 a	B 8,27 b	A 93,3 ab	B 68,2 a	
AZUL	A 6,60 a	B 4,68 b	A 89,7 b	B 48,2 a	
VERMELHO	A 7,55 a	B 5,30 b	A 117,6 a	B 61,4 a	
MÉDIA REGIME	A 6,74	B 5,76	A 94,16	B 57,25	
Rn					
QUALIDADE DE LUZ	REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		SENoidal
	CONSTANTE	SENoidal	CONSTANTE	SENoidal	
A/Ci					

10

¹⁰ Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Tabela 2: Desempenho das trocas gasosas: Taxa fotossintética (A); condutância estomática (gs); taxa transpiratória (E); concentração interna de CO₂ (Ci); eficiência instantânea do uso da água (A/E); eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s); eficiência de carboxilação (A/Ci) e respiração noturna (R_n) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob diferentes qualidades de luz de LEDs (Branco, RBW 3:1:1, azul e vermelho), regime de iluminação e estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação).

ESTÁDIO FRUTIFICAÇÃO					
VARIÁVEIS DE TROCAS GASOSAS					
QUALIDADE DE LUZ		$A (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$		$gs (\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$	
REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ	
CONSTANTE	SENoidal	CONSTANTE	SENoidal	CONSTANTE	SENoidal
BRANCO	B 13,85 a	A 16,33 a	A 0,250 a	A 0,283 a	
RBW	A 15,87 a	A 15,95 a	A 0,250 a	A 0,233 a	
AZUL	A 15,60 a	A 15,77 a	A 0,300 a	A 0,283 a	
VERMELHO	A 15,53 a	A 13,38 a	A 0,233 a	A 0,183 a	
MÉDIA REGIME	B 15,21	A 15,36	A 0,258	B 0,246	
QUALIDADE DE LUZ		$Ci (\mu\text{mol mol}^{-1})$		$E (\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1})$	
REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ		REGIME DE LUZ	
CONSTANTE	SENoidal	CONSTANTE	SENoidal	CONSTANTE	SENoidal
BRANCO	A 277 a	B 244 a	A 2,083 a	A 2,433 a	
RBW	A 265 a	A 261 a	A 2,083 a	A 1,933 a	
AZUL	A 287 a	A 272 a	A 2,250 a	A 2,183 a	
VERMELHO	A 270 a	A 279 a	A 2,100 a	A 1,650 a	
MÉDIA REGIME	A 275	B 264	A 2,129	B 2,049	

11

11 Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre cada regime de iluminação, e minúscula dentro do estádio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). ± Erro padrão.

Para trocas gasosas, na interação tripla durante os estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação) foi observada maior A durante a frutificação (Figura 7 A), e regulação estomática, menores valores de g_s e E neste mesmo estágio (Figura 7 B e D), induzindo menores valores de C_i (Figura 7 C).

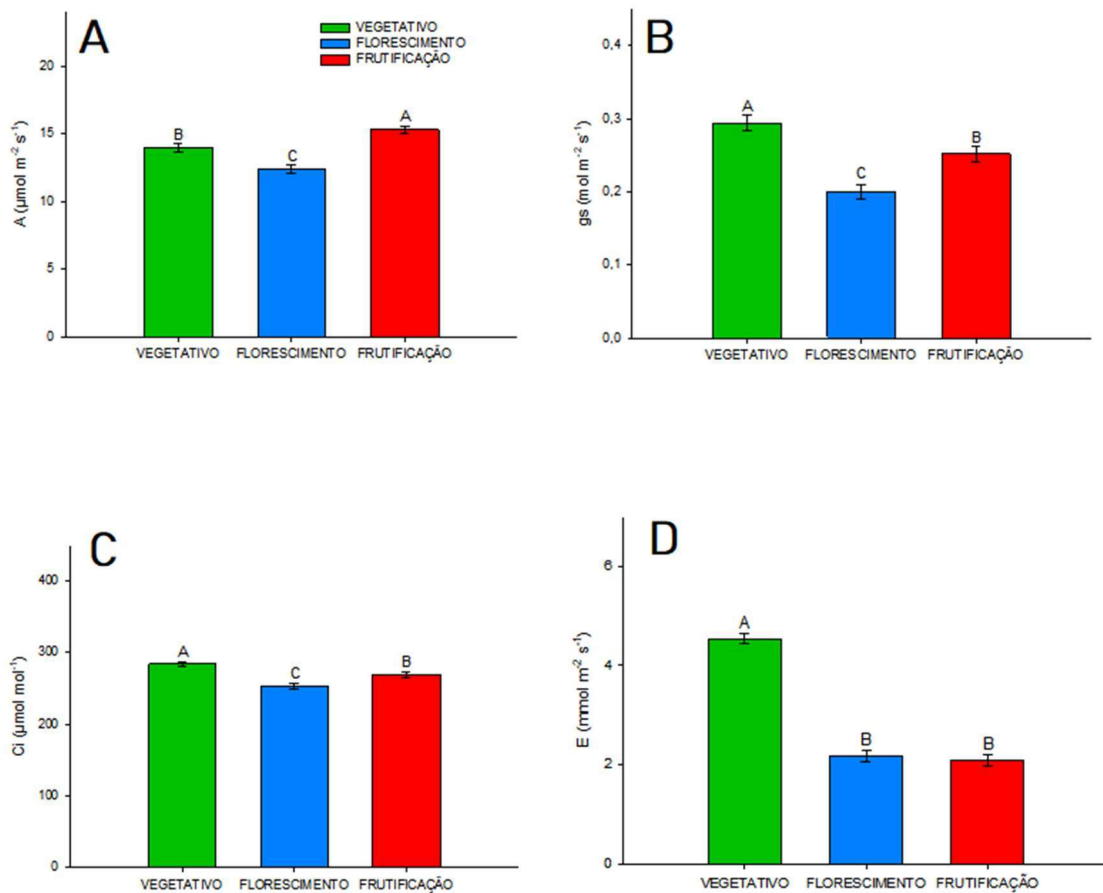


Figura 7: Taxa fotossintética (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i) e taxa transpiratória (E) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

Para a eficiência intrínseca (A/g_s) e instantânea (A/E) no uso da água, a interação tripla demonstrou maiores valores nos estádios de florescimento e de frutificação, respectivamente (Figura 8 A-B). Já para a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) maior atividade foi evidenciada durante o estágio de frutificação (Figura

8 C). Não houve diferenças significativas para a taxa de respiração noturna nos estádios de desenvolvimento das plantas de morango (Figura 8 D).

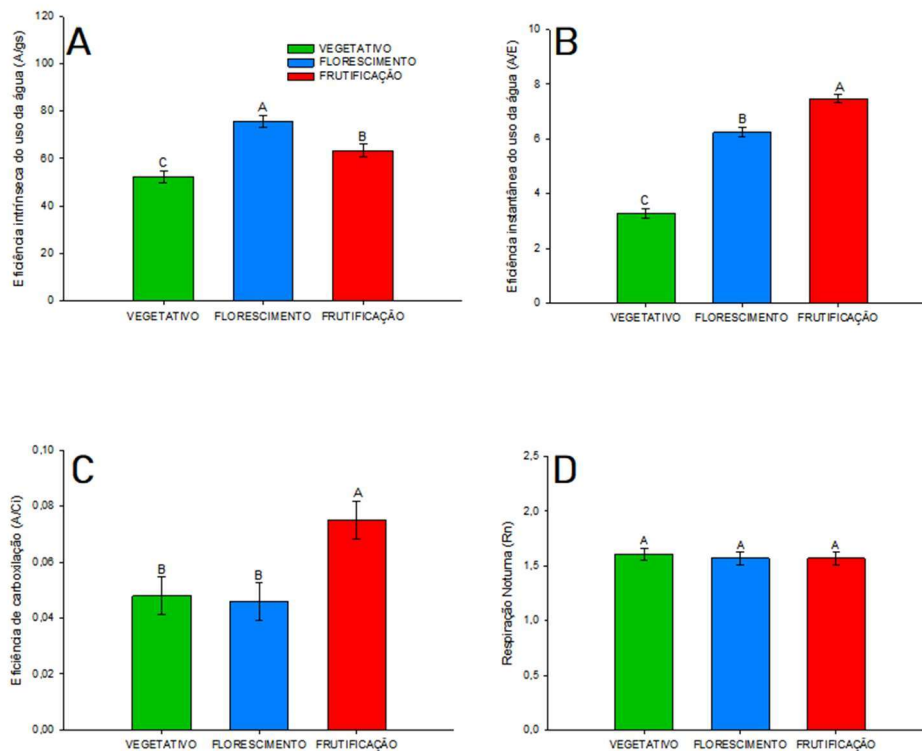


Figura 8: Eficiência intrínseca do uso da água (A/g), eficiência instantânea do uso da água (A/E), eficiência de carboxilação (A/Ci) e respiração noturna (Rn) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

3.2 Análise de componentes principais (PCA) dos parâmetros fisiológicas

Analisando a variação total dos dados, verificaram que as duas primeiras dimensões juntas explicam 49,1% (Figura 9 A-D) da variação observada, sendo 30,2% para DIM1 e 18,9% para DIM2. As pontuações observadas para as duas dimensões relacionadas com os estádios de desenvolvimento (Figura 9 A) revelaram comportamentos distintos. No estágio de desenvolvimento vegetativo (1), há investimento em pigmentos cloroplásticos (Cla, Clb e Cltotais), comportamento estomático (g_s e E) e na concentração interna de CO_2 (C_i). Enquanto, no estágio de

florescimento (2), as plantas investiram em maior capacidade de absorção de energia e desempenho fotoquímico e transporte de elétrons no fotossistema II (Ψ_o , Π_{ABS} , ΦE_o , $ETo.RC$ e F_v/F_m). No estágio de frutificação (3), o investimento ocorre principalmente na eficiência no uso da água (A/E), na fluorescência inicial (F_o) e máxima (F_m), e na taxa de captura máxima do FSII ($TR_o.RC$).

Por outro lado, as pontuações observadas para os regimes de iluminação (constante e senoidal) relacionadas com as qualidades de luz de LEDs (azul, branca, RBW e vermelha) (Figura 9 B), as qualidades de luz de LEDs (Figura 9 C) e os regimes de iluminação isolados (Figura 9 D), mostraram que não há diferenças marcantes nas variáveis avaliadas.

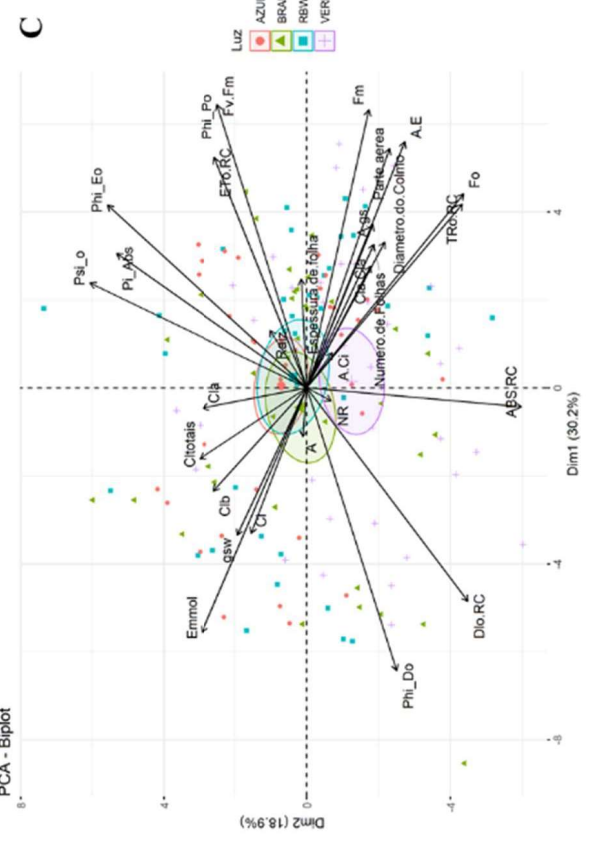
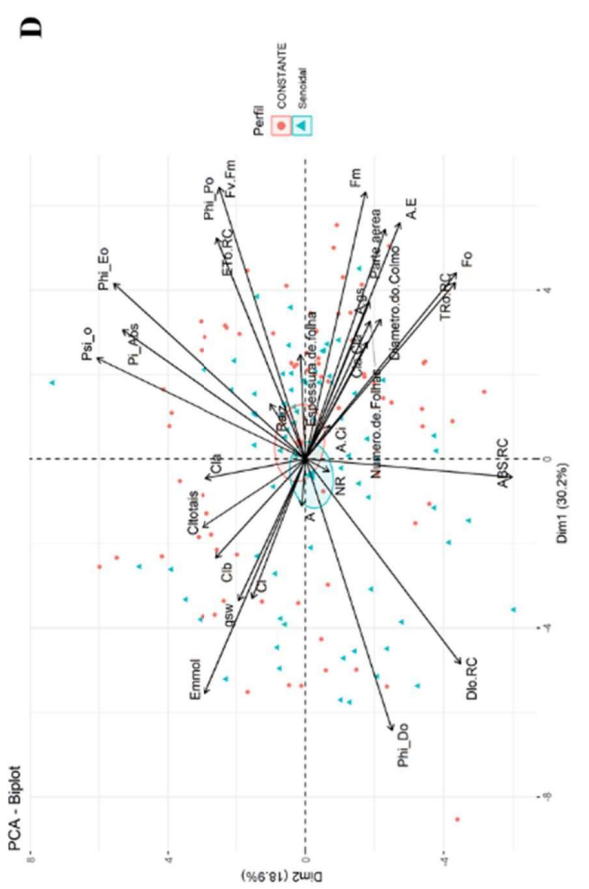
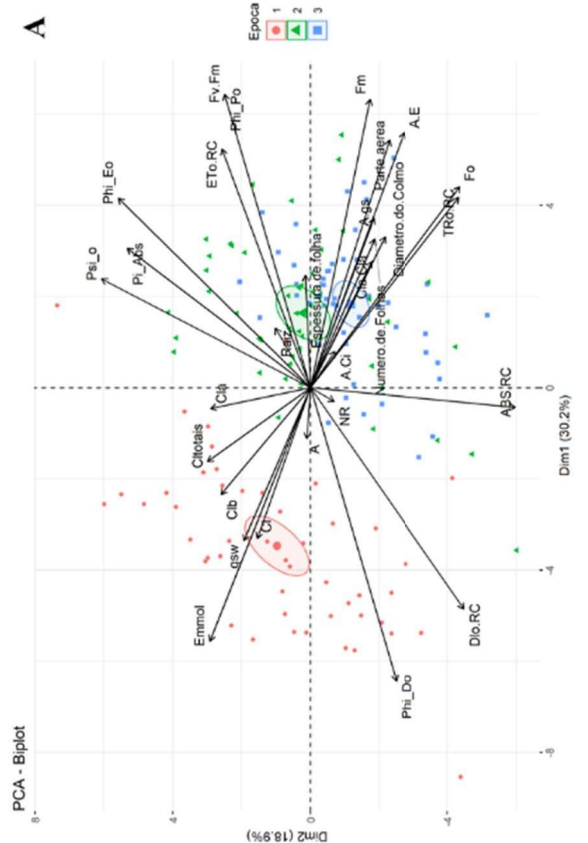
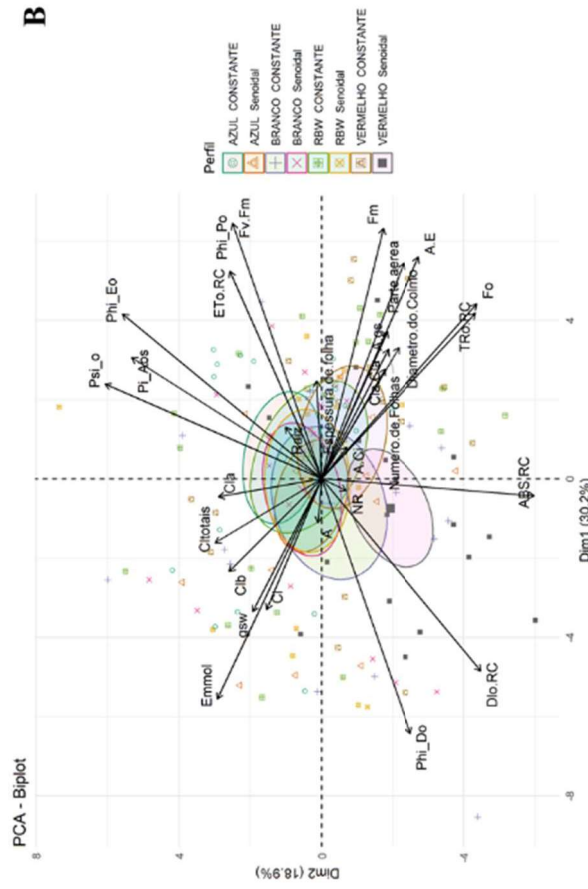


Figura 9: Análise de componentes principais dos parâmetros de trocas gasosas, fluorescência da clorofila a, pigmentos cloroplastídicos e medidas de crescimento: Taxa fotossintética (*A*); condutância estomática (*gsw*); taxa transpiratória (*Emmol*); concentração interna de CO₂ (*Ci*); respiração noturna (*Rn*); eficiência do intrínseco da água (*A.gs*); eficiência instantânea do uso da água (*A.E*); eficiência de carboxilação (*A.Ci*); fluorescência mínima (*Fo*); fluorescência máxima (*Fm*); rendimento quântico máximo do fotossistema II (*Fv/Fm*); movimento da excitação da energia aprisionada dos elétrons para cadeia de transporte de elétrons além da QA (*Psi_0*); rendimento quântico do transporte de elétrons (ΦEo); rendimento quântico máximo do fotossistema II (*Phi-Po*); rendimento quântico da dissipação de energia (ΦDO); índice de desempenho fotoquímico (*PIABS*); absorção por centro de reação (*ABS/RC*); fluxo de dissipação de energia por centro de reação (*Dio/RC*); taxa máxima de excitação aprisionada por centro de reação (*TR0/RC*); transferência máxima de elétrons entre PS II e PS I por centro de reação (*ET0/RC*); clorofila a (*Cl_a*); clorofila b (*Cl_b*); clorofila totais (*Cl_{totais}*); razão entre clorofila a e b (*Cl_a.Cl_b*); parte aérea; números de folhas; espessura das folhas; diâmetro do colmo e raiz de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) e sob qualidades espectrais de luz de LEDs em regime de iluminação de LEDs constante e senoidal.

3.3. Atividade de enzimas antioxidantes de defesa e conteúdo de malonaldeído

Para as enzimas antioxidantes de defesa superóxido (SOD, Figura 10 A) e ascorbato peroxidase (APX, Figura 10 B) houve interação significativa entre as qualidades de luz e o regime de iluminação. Maior atividade da SOD foi observada nas plantas cultivadas sob LEDs vermelhos sem diferir entre os regimes de iluminação (Figura 10 A). Enquanto, na APX maiores valores foram evidenciados sobre as qualidades de luz de LEDs azul e LEDs vermelhos em ambos os regimes de iluminação (Figura 10 B).

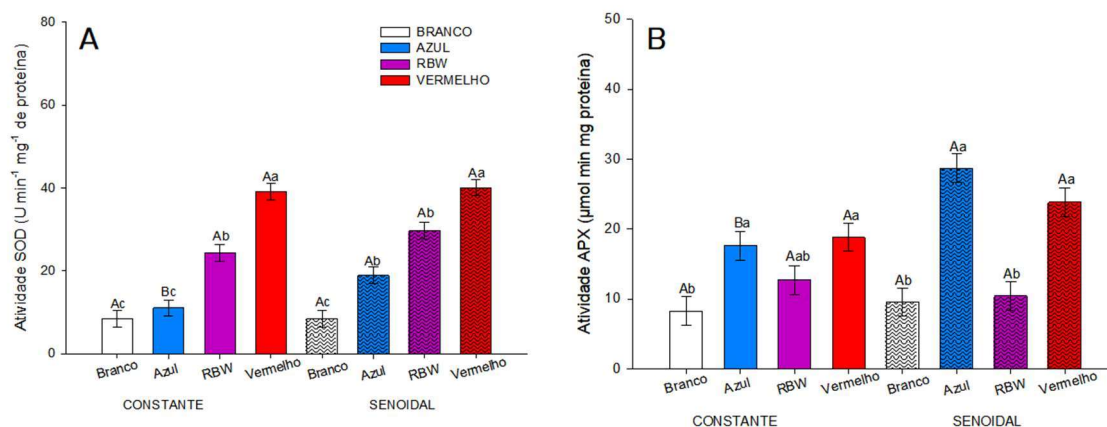


Figura 10: Atividade antioxidante da enzima superóxido dismutase (SOD, A) e atividade antioxidante da enzima Ascorbato peroxidase (APX, B) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

A atividade antioxidante da catalase (*CAT*) apresentou diferenças significativas apenas entre as qualidades de luz de LEDs (Figura 11 A), enquanto o conteúdo de malonaldeído (MDA) foi significativo apenas entre os regimes de iluminação (Figura 11 B). A luz de LEDs vermelha promoveu aumento na atividade da enzima *CAT* (Figura 11 A). Apesar disso, o conteúdo de MDA não diferiu entre os regimes de iluminação de LEDs (Figura 11 B).

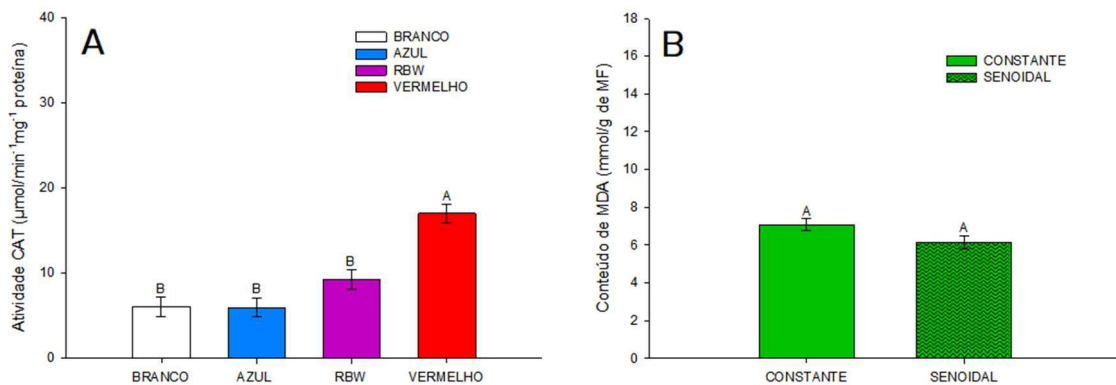


Figura 11: Atividade antioxidante da enzima catalase (*CAT*, A) e conteúdo de malonaldeído (MDA, B) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

3.4. Produtividade e qualidade dos frutos

O diâmetro de frutos (mm) e número de frutos (un) diferiram estatisticamente para os regimes de iluminação da luz de LEDs. Apesar disso, para o número de frutos não houve diferença entre os regimes de iluminação (Figura 12 A-B). No entanto, frutos de morangos cultivados em regimes de luzes senoidal apresentaram maior diâmetro de frutos (Figura 12 B).

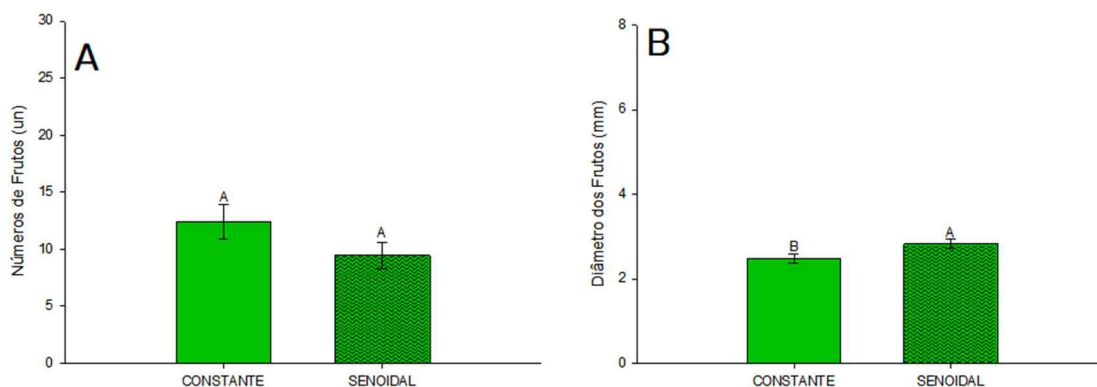


Figura 12: Diâmetro dos frutos (A) e números de frutos (B) em diferentes estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e reprodutivo) de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

A produtividade (g planta^{-1}) apresentou diferença significativa para as qualidades de luzes e regimes de iluminação independente (Figura 13). Em relação a qualidade de luz, foi verificado maior produtividade de plantas sob iluminação de LEDs azuis o volume da produtividade foi maior (Figura 13 A), enquanto para o regime de iluminação foi observado sob iluminação constante (Figura 13 B).

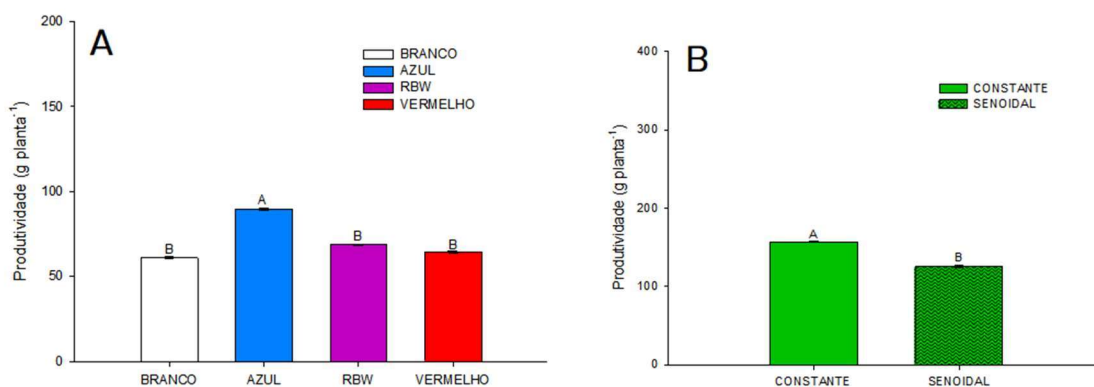


Figura 13: Peso total dos frutos (Kg, A-B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

Para as variáveis de cor dos frutos luminosidade (L^*) e a coordenada amarelo/azul (b^*) houve interação significativa entre a qualidade de luz e o regime de iluminação (Figura 14 A-B). A L^* não diferiram entre os regimes, no entanto, diferiram sob LEDs vermelhos (Figura 14 A). Para b^* os valores foram menores sob LEDs

brancos em regime senoidal e maiores em LEDs vermelhos, independente do regime de iluminação (Figura 14 B).

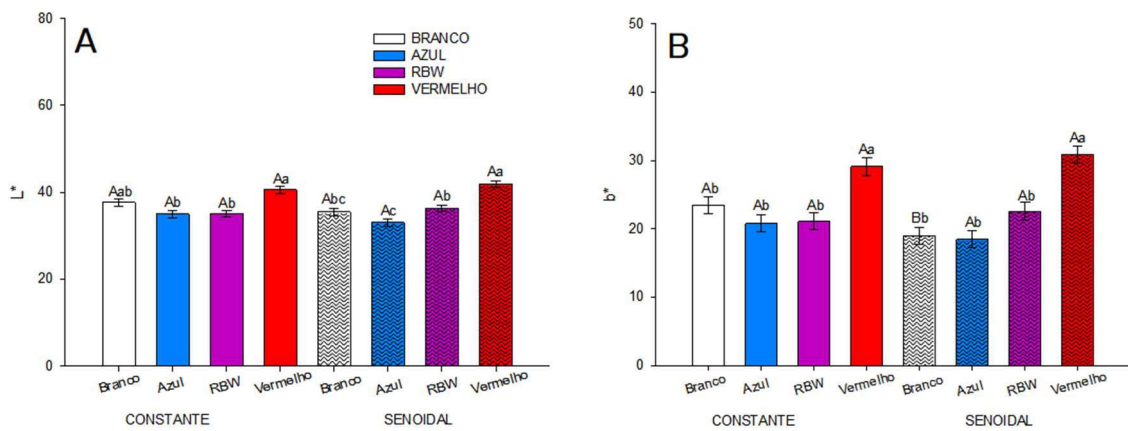


Figura 14: Luminosidade (L^* , A) e coordenada amarelo/azul (b^* , B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

A coordenação vermelho/verde (a^*) diferiu para a qualidade de luz e os regimes da iluminação de LEDs independente (Figura 15 A-B). Sob LEDs vermelhos os frutos de morangos tiveram valores maior de a^* (Figura 15 A), apresentando diferenças entre os regimes de iluminação (Figura 15 B).

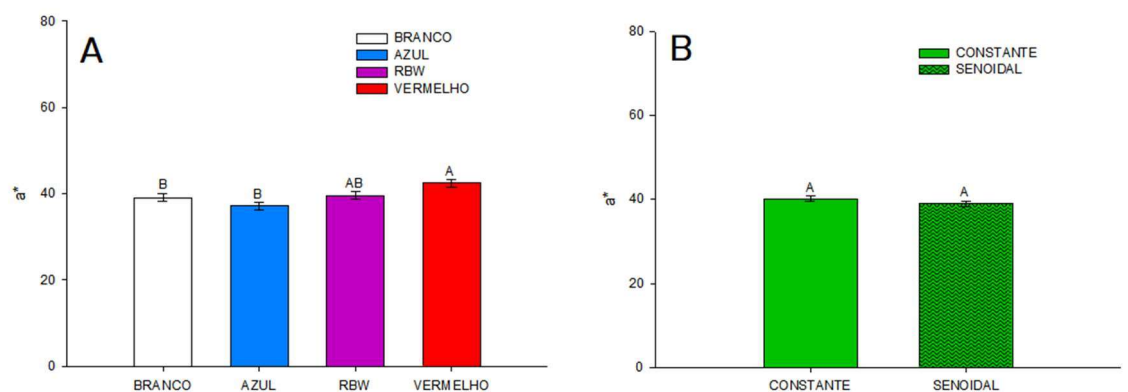


Figura 15: Coordenada vermelho/verde (a^* , A-B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

O teor de compostos bioativos como fenólicos e flavonoides apresentaram **interação** (repetição, reiteração, renovação) ou interação (influência mútua, ação mútua)

significativa entre as diferentes qualidades de luz e regime luminoso (Figura 16 A-B). Compostos fenólicos apresentaram maior teor sob frutos de plantas cultivadas em luz RBW, com teor mais evidente sob regime constante (Figura 16 A), enquanto para flavonoides os teores foram maiores sob o cultivo em luz branca e vermelha em regime constante e azul sob regime senoidal (Figura 16 B).

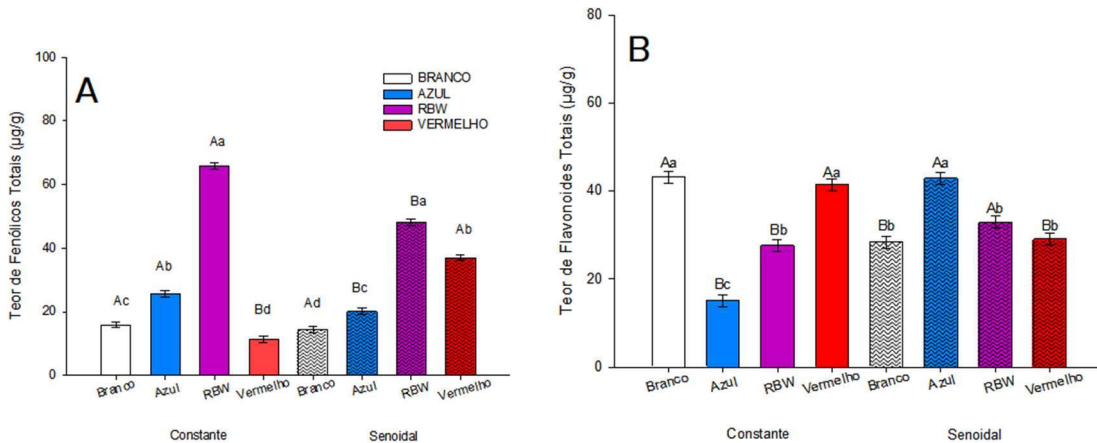


Figura 16: Teor de compostos fenólicos totais (A) e teor de flavonoides (B) em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

O teor de sólidos solúveis foi mais significativo estatisticamente sob as qualidades de iluminação (Figura 17). A concentração de sólidos solúveis foi maior em frutos cultivados sob LEDs brancos e vermelhos (Figura 17).

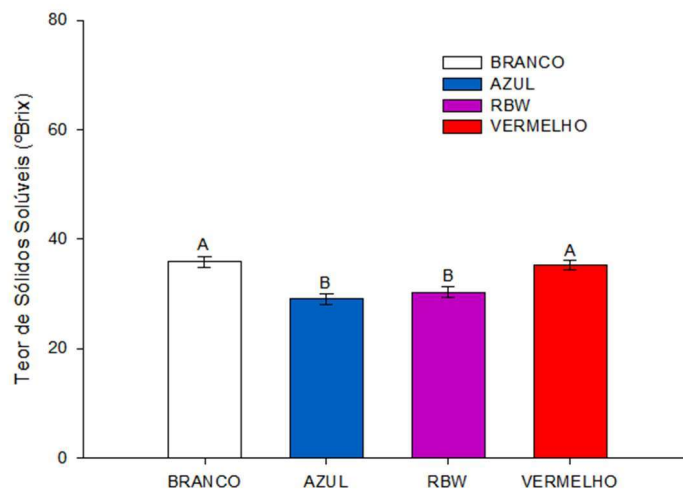


Figura 17: Teor de sólidos solúveis (°Brix) em frutos em frutos de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob regime de iluminação de LEDs constante e senoidal. Médias seguidas de mesma

letra maiúscula entre os regimes de iluminação, e minúscula dentro do estágio de desenvolvimento, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam o erro padrão das médias.

3.5. Análise de componentes principais (PCA) da atividade antioxidante de enzimas de defesa, conteúdo de malondialdeído, teor de sólidos solúveis, pH e acidez

A análise de componentes principais (PCA), mostrou que as duas primeiras dimensões explicam 45,2% (DIM1 24,5% e DIM2 20,7%) da variação total dos dados (Figura 18 A-B). As pontuações observadas para as qualidades de luz de LEDs (azul, branca, RBW e vermelha) (Figura 18 A), revelaram que plantas cultivadas sob luz de LEDs vermelha e RBW, há maior investimento e enzimas antioxidantes de defesa (SOD, CAT e APX) e no conteúdo de malondialdeído (MDA) respectivamente. Maior expressão de compostos fenólicos e pH, foram observados nos frutos produzidos sob luz de LEDs RBW, enquanto, maior investimento em flavonoides e acidez foram observados em frutos sob LEDs azuis e o teor de sólidos solúveis sob LEDs brancos (Figura 18 A).

As pontuações observadas relacionadas aos regimes de iluminação (constante e senoidal) (Figura 18 B), revelaram que as variáveis de pH e °Brix são influenciadas pela iluminação constante, enquanto, os flavonoides e a acidez dos frutos são mais expressos sob iluminação senoidal (Figura 18 B).

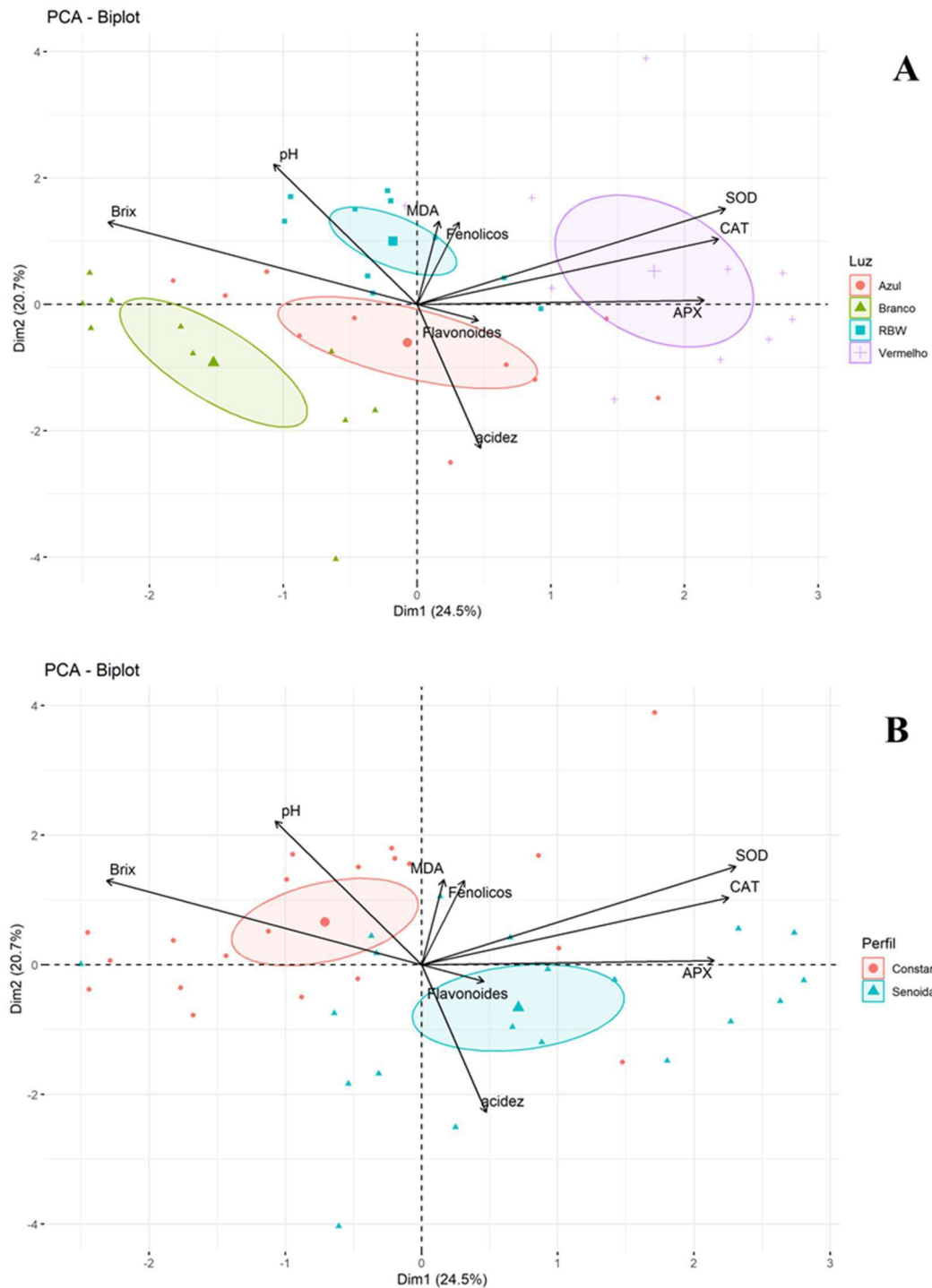


Figura 18: Análise de componentes principais da atividade de enzimas antioxidantes de defesa (SOD, CAT e APX) e do conteúdo de malonaldeído (MDA), e das variáveis de análise de frutos (pH, acidez, °Brix, flavonoides e fenólicos): Ascorbato peroxidase (APX); catalase (CAT); superóxido dismutase (SOD); malonaldeído (MDA); Acidez; teor de sólidos solúveis (°Brix); potencial hidrogênio (pH), fenólicos totais e flavonoides totais de plantas de morango cultivadas em agricultura vertical sob qualidades espectrais de luz de LEDs em regime de iluminação de LEDs constante e senoidal.

4. DISCUSSÃO

A identificação, de qualidades espectrais da luz de LEDs e de regimes de iluminação, que promova melhor desempenho fisiológico, ao mesmo tempo que regule a biossíntese de metabólitos funcionais para a saúde humana, é essencial na produção de alimentos de valor agregado em ambientais controlados, como AVU. Este estudo, mostra que os índices de pigmentos fotossintéticos (*Cl_a* e *Cl_b*) variam de acordo com ciclo reprodutivo das plantas, refletindo no desempenho de fluorescência da iluminação de LEDs fornecida no AVU. Por exemplo, os índices de clorofilas *a* e *b* foram maiores durante o estágio vegetativo e de florescimento, em comparação ao estágio de frutificação (Figura 1) e, apesar de não haver diferenças nas taxas fotossintéticas no estágio vegetativo (Tabela 2), a análise de PCA mostrou maior funcionalidade da *gs* e na *Ci* durante o vegetativo. A manutenção na *gs* é considerada um regulador da resposta de indução fotossintética em função da concentração de CO₂ disponível no ambiente. Os dados deste estudo indicam que as plantas utilizaram de forma eficiente o CO₂ disponível no ambiente, como observado pelos valores das taxas fotossintéticas (Tabela 2), contribuindo para o crescimento constante das plantas de morango. Por outro lado, durante o estágio de florescimento a maior capacidade de absorção de energia, desempenho fotoquímico e transporte de elétrons no fotossistema II (Ψ_o , Π_{ABS} , ΦE_o , $ETo.RC$ e ΦPO) (Figura 9 PCA), parece ser importante na demanda de energia na floração e em ajustes na espessura da folha e comprimento de raiz. A melhoria no desempenho fotoquímico não está associada somente a ajustes nas taxas fotossintéticas para a produção de fotoassimilados, mas, também nas modificações estruturais necessárias para o estabelecimento das plantas e floração. Isso porque a transformação da floração é crítica para o sucesso reprodutivo da planta, e a qualidade espectral da luz, sobretudo a luz azul, é importante na ativação de genes como o *ELONGATED HYPOCOTYL 5* (*HY5*) e o *ZEITLUPE/CHANEL* que regulam a floração (Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019)(Terry *et al.*, 2019) e o tempo de floração respectivamente (Díaz-Galián *et al.*, 2021). Sendo assim, no sistema de AVU a utilização de iluminação que tenha pelo menos uma proporção de luz azul é interessante.

A análise de componentes principais (PCA) também revelou que no estágio de frutificação, o investimento ocorre principalmente na eficiência no uso da água (*A/E* e *A/g_s*) e no desenvolvimento da parte aérea e no diâmetro do colmo. A *A/E* é

impulsionada por *A* e *E*, enquanto a *A/g_s* é impulsionada por *A* e *g_s*, os quais mantiveram seus valores similares nos tratamentos aplicados (Tabela 2 -frutificação). Ambos *A/E* e *A/g_s* foram maiores nas plantas cultivadas, com exceção das plantas cultivadas sob LEDs vermelhos (constante e senoidal) com menores valores (Tabela 2 – frutificação). Esses resultados indicam que as folhas que recebem comprimentos de ondas distintos e/ou que recebam uma proporção de luz azul induzem melhorias das características estomáticas e controle maior na transpiração, ao invés de efeito direto na fotossíntese (taxas fotossintéticas elevadas em todos os tratamentos). Além disso, o investimento em características morfológicas, como a parte aérea (Figura 9 PCA), tem grande impacto na produção da biomassa vegetal, tamanho e área foliar, garantindo que a luz interceptada seja utilizada de forma mais eficiente durante os processos fotossintéticos e na produtividade (Tabela 2) (Shezi *et al.*, 2020).

Neste estudo, evidenciou que sob luz vermelha em ambos os regimes de luz (constante e senoidal), foi observada maior atividade da enzima SOD, enzima chave contra as espécies reativas de oxigênio (EROs), indicando que sob esta qualidade de luz as plantas estejam sofrendo maiores danos oxidativos (Figura 10 A), no entanto maior atividade da enzima CAT mostra, ainda que sob estresse, ser mais toleráveis e com eficiência suficiente de reparo de danos celulares (Figura 11 A). Em contrapartida, sob luz de LEDs azul, as plantas são menos afetadas por danos oxidativos, e apresentam melhor desempenho nos mecanismos de tolerância aos danos oxidativos com maior ação antioxidante da enzima APX (Figura 10 B).

Independente, da qualidade espectral da luz de LEDs testada na AVU, o regime de iluminação constante aumentou maior número de frutos (Figura 12 B) e de produtividade (Figura 13), demonstrando que possivelmente o uso de $350 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ foi ideal para manter a produção de frutos. Isso pode ser, porque a iluminação constante induz o efeito positivo do baixo estado estacionário do fitocromo na área foliar e na interceptação de luz, que promove floração mais acelerada e maior síntese assimilados (Kalaitzoglou *et al.*, 2019). Por outro lado, a maior produção de frutos por plantas e do enriquecimento de compostos bioativos como os o teor de flavonoides totais, foi observado em cultivo sob LEDs azuis, similar ao observado em plantas de morango cultivado em câmeras de crescimento (Nadalini *et al.*, 2017). Estudos com gramíneas, mostraram que a luz vermelha e azul interceptada pelos fitocromo fotomodulam a ativação de genes, HY5/HYH, reguladores do acúmulo de flavonoides (Ferreira *et al.*, 2021), o mesmo observado neste estudo (Figura 15 B). Da mesma forma, que se

observou elevado teor de compostos fenólicos frutos de plantas cultivadas sob LEDs RBW, podendo ser influência da associação a luz azul, que ativa vias de biossíntese deste composto quando demandam ação antioxidante das linhas de defesa (Yu *et al.*, 2021).

Neste estudo foram observados que além da qualidade e do regime de iluminação com LEDs, as plantas realizam ajustes fisiológicos e bioquímicos, também, em função dos estádios de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação) através da fotomodulação. A modulação da luz afeta consideravelmente os processos fotossintéticos, bem como o regime metabólico primário e secundário vegetal (Lauria & Ceccanti, 2022). Por exemplo, a absorção de luz pela folha é mediada por pigmentos fotossintéticos que captam a luz para conduzir a fotossíntese, por meio das clorofilas *a* (*Cl_a*) e *b* (*Cl_b*), que são os pigmentos fotossintéticos primários com potencial máximo de absorção sob as cores azul e vermelha, principalmente sob luz azul, por isso, espera-se que a absorção de luz foliar seja diferente entre os tratamentos (Dieleman *et al.*, 2019). O conteúdo desses pigmentos fotossintéticos foi maior, respectivamente, sob estágio vegetativo (Figura 4 A) e estágio de florescimento (Figura 4 B), estádios em que há investimento necessário na síntese dos pigmentos a fim de potencializar a atividade fotossintética nas plantas, refletindo então em maior biossíntese e acúmulo de açúcares para o estágio de frutificação. Nestes estudos, durante os dois estádios (vegetativo e florescimento) a taxa fotossintética, por exemplo, aumentou gradativamente de acordo com que aumentavam suas necessidades, principalmente sob iluminações de LEDs Azuis, RBW e brancos (Tabela 2). Quando produziam frutos foi observado um teor considerável de brix presentes sob estas qualidades luminosas, mais fotoespecificamente em frutos produzidos sob regime constante (Tabela 2).

Além do desempenho interceptação da luz, observaram alterações nos parâmetros de fluorescência da clorofila *a*. Normalmente, o aumento na fluorescência inicial (F_0) e reduções no rendimento quântico do fotossistema II (ϕ_{Po}) representam alterações na dissipação de energia via complexo antena, resultando em menor transferência de energia para o FSII, como observado nas plantas de morango sob LEDs vermelhos (Tabela 1). Miao *et al.* (2019), também demonstraram que plantas de pepino são sensíveis à luz de LEDs vermelhos, pelos efeitos na ultraestrutura irregular dos cloroplastos, os quais promoveram reduções nos valores de ϕ_{Po} e no rendimento quântico efetivo do FSII (Φ_{II}). Embora se tenha observado baixo ϕ_{Po} , notaram maiores valores de rendimento quântico do fluxo de transporte de elétrons (ϕ_{Eo}) e baixos

índices de dissipação de energia (Dio/RC) ao longo do florescimento (Tabela 2), mostrando que a resposta fotoprotetora tenha sido modulada nas plantas de morango sob luz de LEDs vermelha, sendo suficiente para aliviar a pressão de excitação do FSII e evitar danos oxidativos no aparato fotossintético, evidenciado pelo maiores teores de compostos fenólicos (HeatMap) e ação de atividades enzimáticas de SOD e APX (Figura 10). O aumento nos valores de ABS/RC (Tabela 1) corrobora com esses resultados, indicando reduções no tamanho dos centros de reação ativos, refletindo em mudanças na conectividade energética entre as unidades do FSII (GOMES *et al.*, 2012). Estes resultados sugerem que uma condição estressante para o aparato fotossintético foi gerada nas plantas crescidas sob LEDs vermelhos, desenvolvendo características típicas de folhas de sombra (Poorter *et al.*, 2019), em que o fornecimento inadequado de luz aos fotossistemas limitaram a eficiência fotoquímica e determinaram forte aumento nas vias de dissipação térmica, como observado durante a frutificação. Por outro lado, o ótimo funcionamento do aparato fotossintético das plantas de morango cultivadas sob LEDs RBW, azuis e brancos, ocorreu em função do melhor direcionamento do transporte de elétrons para a fotoquímica (PIABS elevado) e reduzindo a necessidade de dissipação térmica (baixo Dio/RC).

As características de produtividade das plantas de morango cultivadas sob diferentes qualidades e regimes de luz de LEDs são consistentes com o comportamento fotossintético observado. Um aumento no desempenho da fotossíntese (Sakoda *et al.*, 2020a) e maior potencial de g_s são pretendido para aumentar ainda mais a produção de biomassa em plantas cultivadas. No entanto, contrariando os achados de Sakoda *et al.* (2020b), que obteve melhores resultados de produtividade sob regime flutuante, e neste estudo observou-se maior produção em regime constante, pelo fato que sob intensidade constante da luz que é sempre alta, ocorre maior síntese de fotoassimilados e acúmulo mais significativo de carbono (Hikino *et al.*, 2022). Como resultado, ao acelerar a indução fotossintética, é possível proporcionar ganhos de carbono mais eficientes, abrindo novo caminho para melhorar a produção de biomassa em plantas.

Apesar das menores médias de PI_{ABS} e ϕE_o sob regime senoidal, tal condição não foi capaz de causar um nível de estresse que afetasse a concentração de clorofilas, nem aumentasse significativamente a dissipação de energia na forma de calor (ϕDo e Dio/RC). Embora o desempenho fotoquímico não tenha sido favorecido nessa condição, os processos estomáticos e carboxilativos foram favorecidos, culminando em maior produção de frutos. Sabe-se que esse favorecimento, pode estar correlacionado,

fotoespecificamente, ao comportamento dos estômatos por abrirem em resposta ao aumento gradual da intensidade e das propriedades espectrais da luz, especialmente em resposta a luz azul e vermelha demonstrando propriedade fotobiológica específica das células-guardas (Matthews *et al.*, 2020). Portanto, o ajuste do comportamento estomático representa uma resposta importante no ganho de carbono, na fotossíntese e na produtividade geral da planta.

Foi observado que durante o florescimento, uma etapa importante no acúmulo de biomassa, houve declínio na A , g_s e E nas plantas de morango sob luz de LEDs vermelhas em ambos os regimes, apesar de representar um mecanismo conservador de água nos tecidos foliares (A/g_s), pode estar relacionado ao suprimento de CO_2 no mesófilo, em consequência do menor conteúdo energético e percentual de absorção (Roelfsema *et al.*, 2002), acoplando A e g_s via C_i .

O aumento na respiração noturna (R_n) sobretudo nas plantas de morango cultivadas sob luz de LEDs azul constante, pode ter ocorrido em consequência da modulação da resposta fotossintética a essa qualidade espectral. Tais condições podem promover oscilações na taxa respiratória em função da mobilização de substrato disponível para a respiração. A alteração na disponibilidade de substrato é uma das vias importantes para entender a resposta de oscilação da respiração para atender a demanda de energia metabólica (Faber *et al.*, 2022). A baixa disponibilidade de substrato limita a atividade respiratória, quando esta disponibilidade de substrato aumenta, a respiração pode superar a demanda por energia metabólica. Nestas condições, a atividade da rota alternativa do metabolismo respiratório, denominada oxidase alternativa, é aumentada permitindo a oxidação dos substratos e redução dos agentes redutores sem gerar grandes quantidades de ATP (Meyer *et al.*, 2022). Qualquer dano ou estresse a uma planta, possibilita gerar aumento da sua taxa respiratória. Uma possibilidade desse aumento pode estar relacionada com a sintetização de substâncias de defesa ou maior oxidação de carboidratos para geração de energia, metabólitos secundários e macromoléculas para formação de novos tecidos.

Sabe-se que os teores de açúcares são importantes componentes vegetais que determinam o sabor e qualidade do fruto. Estudos mostraram que o tratamento com luz azul aumentou significativamente a síntese de sólidos solúveis totais em tomates cereja na presença de luz azul e vermelha (Gao *et al.*, 2019). Supõe-se que a luz azul retarda o amadurecimento e induz o aumento na quantidade de açúcares e pigmentos (Kong *et al.*, 2021), contrapondo neste estudo, uma vez que os maiores teores de sólidos solúveis

(°Brix) foram em frutos de plantas sob luz branca, que pode ser justificado em função da pequena proporção de luz verde contida no espectro do branco, conforme abordado por Fang *et al.* (2023). Em relação, a coloração não foram observados regimes de cor diversificados nos frutos (luminosidade da epiderme do fruto) dos frutos (Figura 15 A). Porém, aqueles produzidos sob qualidade de luz branca exibiram tonalidades mais amareladas (Figura 15 B), ao mesmo tempo que frutos produzidos sob LEDs vermelhos apresentaram tonalidades mais avermelhadas. Estas características de coloração podem indicar concentração de compostos modulados pela luz para atuarem, provavelmente como antioxidantes, aumentando o teor de bioativos na composição dos frutos. Nesse sentido a produção de alimentos em AVU, permite o cultivo de alimentos com potencialidade para cultivo e consumo, uma vez que é possível a produção em alta escala verticalizada, e em menor espaço de cultivo, sem adição de produtos químicos que comprometam sua composição nutricional e que podem ser consumidos imediatamente frescos e ricos em bioativos nutracêuticos, tornando-os acessíveis à comunidade.

5. CONCLUSÃO

Os dados demonstram que em aspectos fisiológicos, as plantas cultivadas sob luz azul ou com combinações que continham uma fração de azul, apresentaram melhores eficiências fisiológicas, bem como responderam eficientemente mediante aos aspectos de fluorescência. No entanto, a luz branca exerceu maior concentração de sólidos solúveis totais, enquanto a luz vermelha isolada apresentou menores eficiência e rendimento no regime das plantas de morango. Os regimes luminosos não foram significativos estatisticamente na maioria das características de desenvolvimento e desempenho das plantas de morango, entretanto os dados mostram que as plantas realizam ajustes fisiológicos de acordo com suas necessidades conforme cada estágio de desenvolvimento (vegetativo, florescimento e frutificação). Embora a luz vermelha possa ativar mecanismos de tolerância ao estresse oxidativo e reparação celular nas plantas de morango, neste estudo, a luz azul e qualidades de luz contendo frações de azul como a luz RBW e branca, mostram-se mais efetivas no desempenho fisiológico,

principalmente em maiores índices na taxa fotossintética melhorando os compostos como açúcares e compostos bioativos.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, H. A., Yu-Xin, T., & Qi-Chang, Y. (2020). Optimal control of environmental conditions affecting lettuce plant growth in a controlled environment with artificial lighting: A review. In *South African Journal of Botany* (Vol. 130, pp. 75–89). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.12.018>
- Annunziata, M. G., Apelt, F., Carillo, P., Krause, U., Feil, R., Mengin, V., Lauxmann, M. A., Köhl, K., Nikoloski, Z., Stitt, M., & Lunn, J. E. (2017). Getting back to nature: A reality check for experiments in controlled environments. *Journal of Experimental Botany*, *68*(16), 4463–4477. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx220>
- Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. In *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* (Vol. 94, Issue 3, pp. 277–283). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1574214>
- Bian, Z., Cheng, R., Wang, Y., Yang, Q., & Lu, C. (2018). Effect of green light on nitrate reduction and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) under short-term continuous light from red and blue light-emitting diodes. *Environmental and Experimental Botany*, *153*, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.010>
- Birkby, J. (2016). *A program of the National Center for Appropriate Technology • 1-800-346-9140 • www.attra.ncat.org. www.ncat.org*
- Blom, T., Jenkins, A., Pulselli, R. M., & van den Dobbelsteen, A. A. J. F. (2022). The embodied carbon emissions of lettuce production in vertical farming, greenhouse horticulture, and open-field farming in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production*, *377*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134443>
- Chance, E., Ashton, W., Pereira, J., Mulrow, J., Norberto, J., Derrible, S., & Guilbert, S. (2018). The Plant—An experiment in urban food sustainability. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, *37*(1), 82–90. <https://doi.org/10.1002/ep.12712>
- Costa, É. L. G., Farnese, F. dos S., de Oliveira, T. C., Rosa, M., Rodrigues, A. A., Resende, E. C., Januario, A. H., & Silva, F. G. (2021). Combinations of Blue and Red LEDs Increase the Morphophysiological Performance and Furanocoumarin Production of *Brosimum gaudichaudii* Trécul in vitro. *Frontiers in Plant Science*, *12*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.680545>
- Dieleman, J. A., De Visser, P. H. B., Meinen, E., Grit, J. G., & Dueck, T. A. (2019). Integrating morphological and physiological responses of tomato plants to light quality to the crop level by 3D modeling. *Frontiers in Plant Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00839>

- Faber, A. H., Griffin, K. L., Tjoelker, M. G., Pagter, M., Yang, J., & Bruhn, D. (2022). Consistent diurnal pattern of leaf respiration in the light among contrasting species and climates. *New Phytologist*, *236*(1), 71–85. <https://doi.org/10.1111/nph.18330>
- Fang, H. H., Lee, W. L., Chiu, K. T., Ma, H. Y., Yang, S. H., Hung, C. Y., Chen, H. L., Tung, C. W., & Tsai, Y. C. (2023). Irradiation with green light at night has great effects on the management of *Conopomorpha sinensis* and maintains favorable litchi fruit quality. *Scientia Horticulturae*, *312*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111830>
- Ferreira, M. L. F., Serra, P., & Casati, P. (2021). Recent advances on the roles of flavonoids as plant protective molecules after UV and high light exposure. In *Physiologia Plantarum* (Vol. 173, Issue 3, pp. 736–749). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/ppl.13543>
- Gao, Y., Tian, P., Li, J., Cao, Y., Xu, W., & Li, J. (2019). Transcriptional changes during tomato ripening and influence of brackish water irrigation on fruit transcriptome and sugar content. *Plant Physiology and Biochemistry*, *145*, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.10.025>
- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide Dismutases. In *Plant Physiol* (Vol. 59).
- Gontijo, D. C., Brandão, G. C., Gontijo, P. C., de Oliveira, A. B., Diaz, M. A. N., Fietto, L. G., & Leite, J. P. V. (2017). Identification of phenolic compounds and biologically related activities from *Ocotea odorifera* aqueous extract leaves. *Food Chemistry*, *230*, 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.087>
- Havr, E. A., & Mchale, N. A. (1987). Biochemical and Developmental Characterization of Multiple Forms of Catalase in Tobacco Leaves. In *Plant Physiol* (Vol. 84). www.plantphysiol.org
- Heath' And, R. L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated Chloroplasts I. Kinetics and Stoichiometry of Fatty Acid Peroxidation. In *ARCHIVES OF BIOCHEMISTRY AND BIOPHYSICS* (Vol. 126).
- Kalaitzoglou, P., van Ieperen, W., Harbinson, J., van der Meer, M., Martinakos, S., Weerheim, K., Nicole, C. C. S., & Marcelis, L. F. M. (2019). Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. *Frontiers in Plant Science*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00322>
- Kochetova, G. V., Avercheva, O. V., Bassarskaya, E. M., & Zhigalova, T. V. (2022). Light quality as a driver of photosynthetic apparatus development. In *Biophysical Reviews* (Vol. 14, Issue 4, pp. 779–803). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s12551-022-00985-z>
- Kong, D., Zhao, W., Ma, Y., Liang, H., & Zhao, X. (2021). Effects of light-emitting diode illumination on the quality of fresh-cut cherry tomatoes during refrigerated storage. *International Journal of Food Science and Technology*, *56*(4), 2041–2052. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14836>
- Longo, O. T. Del, Gonzalez, C. A., Pastori, G. M., & Trippi, V. S. (1993). Antioxidant Defences under Hyperoxygenic and Hyperosmotic Conditions in Leaves of Two Lines of Maize with Differential Sensitivity to Drought. In *Plant Cell Physiol* (Vol. 34, Issue 7).

- Matthews, J. S. A., Vialet-Chabrand, S., & Lawson, T. (2020). Role of blue and red light in stomatal dynamic behaviour. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 71, Issue 7, pp. 2253–2269). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz563>
- Meyer, E. H., Letts, J. A., & Maldonado, M. (2022). Structural insights into the assembly and the function of the plant oxidative phosphorylation system. In *New Phytologist* (Vol. 235, Issue 4, pp. 1315–1329). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/nph.18259>
- Miller, K., Feucht, W., & Schmid, M. (2019). Bioactive compounds of strawberry and blueberry and their potential health effects based on human intervention studies: A brief overview. In *Nutrients* (Vol. 11, Issue 7). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/nu11071510>
- Nájera, C., Gallegos-Cedillo, V. M., Ros, M., & Pascual, J. A. (2022). *LED Lighting in Vertical Farming Systems Enhances Bioactive Compounds and Productivity of Vegetables Crops*. 24. <https://doi.org/10.3390/iecho2022-12514>
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. In *Plant & Cell Physiol* (Vol. 22, Issue 5). <https://academic.oup.com/pcp/article-abstract/22/5/867/1835201>
- Ngcobo, B. L., Bertling, I., & Clulow, A. D. (2020). Preharvest illumination of cherry tomato reduces ripening period, enhances fruit carotenoid concentration and overall fruit quality. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 95(5), 617–627. <https://doi.org/10.1080/14620316.2020.1743771>
- Paradiso, R., & Proietti, S. (2022). Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems. In *Journal of Plant Growth Regulation* (Vol. 41, Issue 2, pp. 742–780). Springer. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Ntagkas, N., Siebenkäs, A., Mäenpää, M., Matsubara, S., & Pons, T. L. (2019). A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. In *New Phytologist* (Vol. 223, Issue 3, pp. 1073–1105). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.15754>
- Rayhana, R., Xiao, G., & Liu, Z. (2020). Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 4(3), 195–211. <https://doi.org/10.1109/JRFID.2020.2984391>
- Roelfsema, M. R. G., Hanstein, S., Felle, H. H., & Hedrich, R. (2002). CO₂ provides an intermediate link in the red light response of guard cells. *Plant Journal*, 32(1), 65–75. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.2002.01403.x>
- Sakoda, K., Kaga, A., Tanaka, Y., Suzuki, S., Fujii, K., Ishimoto, M., & Shiraiwa, T. (2020). Two novel quantitative trait loci affecting the variation in leaf photosynthetic capacity among soybeans. *Plant Science*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110300>
- Sakoda, K., Yamori, W., Shimada, T., Sugano, S. S., Hara-Nishimura, I., & Tanaka, Y. (2020). Higher Stomatal Density Improves Photosynthetic Induction and Biomass Production

- in Arabidopsis Under Fluctuating Light. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.589603>
- Shao, Y., Li, J., Zhou, Z., Hu, Z., Zhang, F., Cui, Y., & Chen, H. (2021). The effects of vertical farming on indoor carbon dioxide concentration and fresh air energy consumption in office buildings. *Building and Environment*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107766>
- Terry, M. I., Pérez-Sanz, F., Díaz-Galián, M. V., de los Cobos, F. P., Navarro, P. J., Egea-Cortines, M., & Weiss, J. (2019). The petunia CHANEL gene is a ZEITLUPE ortholog coordinating growth and scent profiles. *Cells*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/cells8040343>
- Viršilė, A., Miliauskienė, J., Haimi, P. J., Laužikė, K., & Samuolienė, G. (2020). The comparison of constant and dynamic red and blue light irradiation effects on red and green leaf lettuce. *Agronomy*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy10111802>
- Wang, P., Chen, S., Gu, M., Chen, X., Chen, X., Yang, J., Zhao, F., & Ye, N. (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), 1–18. <https://doi.org/10.3390/ijms21134606>
- Yan, Z., He, D., Niu, G., Zhou, Q., & Qu, Y. (2020). Growth, nutritional quality, and energy use efficiency in two lettuce cultivars as influenced by white plus red versus red plus blue leds. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(2), 33–40. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201302.5135>
- Yu, Z. C., Lin, W., Zheng, X. T., Chow, W. S., Luo, Y. N., Cai, M. L., & Peng, C. L. (2021). The relationship between anthocyanin accumulation and photoprotection in young leaves of two dominant tree species in subtropical forests in different seasons. *Photosynthesis Research*, 149(1–2), 41–55. <https://doi.org/10.1007/s11120-020-00781-4>
- Zheng, L., He, H., & Song, W. (2019). Application of light-emitting diodes and the effect of light quality on horticultural crops: A review. In *HortScience* (Vol. 54, Issue 10, pp. 1656–1661). American Society for Horticultural Science. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14109-19>
- Zhu, X. G., Ort, D. R., Whitmarsh, J., & Long, S. P. (2004). The slow reversibility of photosystem II thermal energy dissipation on transfer from high to low light may cause large losses in carbon gain by crop canopies: A theoretical analysis. *Journal of Experimental Botany*, 55(400), 1167–1175. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh141>