

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE, PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE ALFACES
TROPICALIZADAS SOB DIFERENTES ESPECTROS DE
LUZ LED

Autor: Bruno Dourado Rodrigues
Orientador: Dr. Fabiano Guimarães Silva
Coorientadoras: Dr^a. Fabia Barbosa da Silva
Dr^a. Ana Carolina Silva Siquieroli

RIO VERDE – GO
Fevereiro - 2026

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE, PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE ALFACES
TROPICALIZADAS SOB DIFERENTES ESPECTROS DE
LUZ LED

Autor: Bruno Dourado Rodrigues
Orientador: Dr. Fabiano Guimarães Silva
Coorientadoras: Dr^a. Fabia Barbosa da Silva
Dr^a. Ana Carolina Silva Siquieroli

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias-Agronomia, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde - Área de Concentração Ciências Agrárias.

RIO VERDE – GO
Fevereiro - 2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

R696 Dourado Rodrigues, Bruno
Biofortificação agronômica de alfaces tropicalizadas sob
diferentes espectros de luz Led / Bruno Dourado Rodrigues. Rio
Verde 2026.
58f. il.
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva.
Coorientadora: Profª. Dra. Fabia Barbosa da Silva.
Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de
0231014 - Mestrado em Ciências Agrárias - Agronomia - Rio
Verde (Campus Rio Verde).
1. Agricultura Vertical. 2. Iluminação artificial. I. 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

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☒ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☐ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Bruno Dourado Rodrigues

Matrícula:

2025102310140002

Título do trabalho:

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE ALFACES TROPICALIZADAS SOB DIFERENTES ESPECTROS DE LUZ LED

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 15 / 03 / 2026

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
gov.br
BRUNO DOURADO RODRIGUES
Data: 17/03/2026 13:36:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde

Local

09 / 03 / 2026
Data

Assinatura

gov.br

Documento assinado digitalmente

FABIANO GUIMARAES SILVA

Data: 17/03/2026 13:58:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



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

Formulário 3/2026 - CGAB-RV/CMPRV/IFGOIANO

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE ALFACES TROPICALIZADAS SOB DIFERENTES
ESPECTROS DE LUZ LED**

Autor(a): Bruno Dourado Rodrigues

Orientador(a): Dr. Fabiano Guimarães Silva

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

APROVADA em, 20 de fevereiro de 2026.

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

Prof. Dr. Luis Felipe Villani Purquerio (Membro externo)
Avaliador externo – Instituto Agronômico de Campinas



Documento assinado digitalmente
LUIS FELIPE VILLANI PURQUERIO
Data: 06/03/2026 16:06:53-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Marcio Rosa
Avaliador externo – Universidade de Rio Verde

Prof.^a Dr.^a Juliana de Fátima Sales
Avaliador interno – IF Goiano / Campus Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fabiano Guimaraes Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 04/03/2026 10:07:55.
- **Juliana de Fatima Sales, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 04/03/2026 10:12:22.
- **Márcio Rosa, Márcio Rosa - Professor Avaliador de Banca - Fesurv - Universidade de Rio Verde (01815216000178)** , em 04/03/2026 12:30:46.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/03/2026. 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: 793707

Código de Autenticação: 3dd14be140



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e pela vida. Aos meus pais, Edinei Rodrigues e Rejany Dourado, pelo apoio incondicional e por me incentivarem a iniciar esta jornada no mestrado. Ao meu irmão, Edinei Junior, pela parceria de sempre em todos os momentos. À minha esposa, Patrícia Alves, pelo companheirismo, paciência e por estar sempre a meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva, por todo o suporte, confiança e auxílio, que foram fundamentais ao longo desta trajetória. Às minhas coorientadoras, Dra. Fabia Barbosa Silva e Dra. Carol Siquieroli, pela colaboração e eficiência. Agradeço pela rapidez e precisão nas orientações, que foram essenciais para a escrita desta dissertação e execução do projeto. Ao Prof. Dr. Lucas Loram Lourenço, agradeço por ser um parceiro tanto na vida pessoal quanto profissional, auxiliando prontamente em cada etapa. Ao meu amigo Artur Simão Lemos, pela amizade e pela ajuda mútua nas rotinas do laboratório e nas diversas fases deste mestrado.

Ao Laboratório de Estudos Avançados em Agricultura Vertical (LEAV), por disponibilizar toda a estrutura e suporte necessários para a realização do experimento. Em nome do laboratório, estendo meus agradecimentos a todos os que dele fazem parte: alunos de iniciação científica, mestrandos, doutorandos, pós-doutorandos, técnicos laboratoriais e estruturais. O auxílio de cada um de vocês, direta ou indiretamente, foi fundamental para a minha formação e para a execução deste trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Bruno Dourado Rodrigues iniciou sua trajetória acadêmica no curso de Agronomia no Centro Universitário de Mineiros (UNIFIMES), em Mineiros-GO. Posteriormente, deu continuidade aos estudos na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), em Nova Xavantina-MT, onde despertou o interesse pela investigação científica e iniciou as primeiras experiências como pesquisador. Concluiu a graduação pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), no campus de Barra do Garças-MT.

Logo após a graduação, ingressou no mestrado pelo Instituto Federal Goiano, campus Rio Verde. A afinidade técnica com automação hidráulica e elétrica direcionou sua atuação para o Laboratório de Estudos Avançados em Agricultura Vertical (LEAV), onde se especializou em estruturas para produção de hortaliças, com ênfase em sistemas automatizados de iluminação artificial e irrigação.

Essa caminhada acadêmica viabilizou a integração entre o conhecimento agrônomo e a tecnologia de ponta, experiência consolidada pela colaboração com a *startup* Arandu. Nessa parceria, desenvolveu competências práticas na montagem de sistemas e estruturação de protótipos, contribuindo para o avanço técnico da empresa, direcionando sua carreira para a inovação tecnológica voltada à agricultura vertical.

ÍNDICE

	Página
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
2 OBJETIVOS.....	6
2.1 OBJETIVO GERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
CAPÍTULO I.....	7
3.1 INTRODUÇÃO	8
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.2.1 Material genético e condições experimentais	10
<i>3.2.1.1 Local do experimento.....</i>	<i>10</i>
<i>3.2.1.2 Produção das mudas</i>	<i>10</i>
<i>3.2.1.3 Estrutura das unidades de cultivo e condições experimentais</i>	<i>11</i>
<i>3.2.1.4 Solução nutritiva e condução do cultivo</i>	<i>12</i>
<i>3.2.1.5 Delineamento experimental.....</i>	<i>11</i>
3.2.2 Avaliações	13
<i>3.2.2.1 Parâmetros agronômicos</i>	<i>13</i>
<i>3.2.2.2 Atributos Morfoanatômicos Foliares</i>	<i>14</i>
<i>3.2.2.3 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a</i>	<i>14</i>
<i>3.2.2.4 Conteúdo de clorofilas</i>	<i>15</i>
<i>3.2.2.5 Micro e macronutrientes.....</i>	<i>16</i>
3.5.3 Análise estatística	16
3.3 RESULTADOS	17
3.3.1 Conteúdo de clorofilas em alfaces sob diferentes qualidades de Luz.....	17
3.3.2 Alterações nos parâmetros de fluorescência da clorofila <i>a</i>	19

3.3.4 A alteração morfoanatômica nas folhas em resposta a regimes de iluminação	23
3.3.5 Características estomáticas modificadas pela qualidade espectral da luz.....	25
3.3.6 Desempenho agrônômico da alface <i>versus</i> qualidade de luminosidade.....	25
3.3.7 Perfil de nutrientes foliares em condições de luz variável	28
3.3.8 Análise de Componentes Principais (PCA)	28
3.3.9 Redes Neurais.....	29
3.4 DISCUSSÃO	32
3.4.1 UFU-Biofort: pigmentos fotossintéticos como moduladores da regulação fotoquímica e da produtividade em ambiente <i>indoor</i>	32
3.4.2 Correlação entre o incremento nutricional e a morfologia foliar na UFU-189#1#2#1	35
3.4.3 A fotoquímica da qualidade de luz como <i>driver</i> de biofortificação nutricional: interação com genótipos de alta capacidade de adaptação fisiológica	37
3.5 CONCLUSÕES	38
3.6 REFERÊNCIAS.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Módulos experimentais de cultivo aeropônico de alface (<i>Lactuca sativa</i> L.) sob diferentes qualidades espectrais (Branco, Azul, Vermelho e RBW).	12
Figura 2. Perfil espectral e densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) dos tratamentos luminosos, obtidos via espectrômetro portátil LI-180 (LI-COR Biosciences): Azul (A), Vermelho (B), RBW (C) e Branco (D).	12
Figura 3. Avaliação das trocas gasosas em plantas de alface, utilizando um analisador de fotossíntese por infravermelho (IRGA, modelo LI-6800).	15
Figura 4. Teores de pigmentos fotossintéticos em linhagens de alface submetidas a diferentes qualidades de luz (mg.g^{-1} MF) (A) Clorofila <i>a</i> ; (B) Clorofila <i>b</i> – Genótipos; (C) Clorofila Total; (D) Clorofila <i>b</i> – Espectros de luz; (E) Razão Clorofila <i>a/b</i>	18
Figura 5. Parâmetros de eficiência da fluorescência da clorofila <i>a</i> em linhagens de alface sob diferentes espectros de luz. (A) Eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m); (B) Índice de desempenho fotossintético (P_i_Abs); (C) Fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ETo/RC); (D) Rendimento quântico efetivo do transporte de elétrons (ΦE_o).	19
Figura 6. Fluxos específicos de energia e dissipação térmica em folhas de alface cultivadas sob diferentes qualidades de luz. (A) Fluxo de absorção por centro de reação (ABS/RC); (B) Rendimento quântico da dissipação de energia (ΦD_o); (C) Fluxo de energia dissipada por centro de reação (DIo/RC).	20
Figura 7. Trocas gasosas e eficiência fisiológica em linhagens de alface sob diferentes espectros de luz. (A) Condutância estomática (g_s); (B) Taxa de transpiração (E); (C)	

Concentração interna de CO₂ (C_i); (D) Taxa fotossintética líquida (A); (E) Eficiência instantânea de carboxilação (C_i/C_a); (F) Eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s)... **22**

Figura 8. Atributos estruturais de suculência de alface desenvolvidos sob diferentes espectros de luz. (A) Área foliar; (B) Espessura foliar; (C) Densidade foliar; (D) Espessura do pecíolo; (E) Massa foliar específica (LMA). **24**

Figura 9. Características agronômicas e produção de biomassa de linhagens de alface em sistema controlado com diferentes LEDs. (A) Comprimento do caule; (B) Comprimento da raiz; (C) Diâmetro da planta; (D) Massa fresca foliar; (E) Massa fresca total. **27**

Figura 10. Análise de Componentes Principais (PCA) – Biplot ilustrando as correlações entre variáveis agronômicas, fisiológicas, anatômicas e nutricionais de quatro genótipos de alface cultivados sob diferentes espectros de luz em sistema vertical aeropônico. (A) Azul; (B) RBW; (C) Vermelho; (D) Branco. **29**

Figura 11. Mapa Auto-Organizável (Self-Organizing Map – SOM) treinado para o sistema vertical aeropônico de alface, considerando a interação entre genótipos e espectros de luz. Na parte superior, são apresentados os mapas de distribuição das unidades de entrada correspondentes aos espectros azul, vermelho, branco, RBW e aos genótipos avaliados. Na parte inferior, os mapas de componentes (*heatmaps*) representam a distribuição espacial das variáveis fisiológicas, anatômicas, nutricionais e produtivas na grade hexagonal 6x6, codificada por cores, em que tons de azul indicam menores valores e tons de vermelho indicam maiores valores das variáveis. **31**

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características estomáticas (área, densidade, condutância máxima teórica e frequência de células-guarda) avaliadas nas faces adaxial e abaxial de folhas de genótipos de alface submetidas a diferentes qualidades de luz.....	25
Tabela 2. Concentração foliar de macronutrientes (Ca, K, Mg, P) e micronutrientes (Mn, Zn) em genótipos de alface (<i>Lactuca sativa</i>) submetidos a diferentes espectros de luz em ambiente controlado.....	28

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

A: Taxa fotossintética líquida

ABS/RC: Fluxo de absorção por centro de reação

Ci/Ca: Eficiência instantânea de carboxilação

DIo/RC: Fluxo de energia dissipada por centro de reação

DLI: Integral diária de luz (Daily Light Integral)

EAA: Espectrofotometria de Absorção Atômica

ETo/RC: Fluxo de transporte de elétrons por centro de reação

Fv/Fm: Eficiência quântica máxima do Fotossistema II

g_{wmax}: Condutância estomática máxima teórica

IRGA: Analisador de gás infravermelho (Infrared Gas Analyzer)

LMA: Massa foliar específica (Leaf Mass per Area)

PCA: Análise de Componentes Principais

Pi_Abs: Índice de desempenho fotossintético (baseado na absorção)

PSII: Fotossistema II

RBW: Espectro de luz Vermelho, Azul e Branco (Red, Blue, White)

SOM: Mapas Auto-Organizáveis (Self-Organizing Maps)

ΦDo: Rendimento quântico para a dissipação de energia

ΦEo: Rendimento quântico para o transporte de elétrons

RESUMO

RODRIGUES, BRUNO DOURADO. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2026. **Biofortificação agrônômica de alfaces tropicalizadas sob diferentes espectros de luz LED.** Orientador: Dr. Fabiano Guimarães Silva, Coorientadoras: Dr^a. Fabia Barbosa da Silva e Dr^a. Ana Carolina Silva Siquieroli.

O cultivo vertical de hortaliças representa uma alternativa estratégica para a segurança alimentar frente às mudanças climáticas. Apesar do avanço tecnológico, ainda se observa uma lacuna na literatura científica em relação ao potencial de biofortificação de genótipos tropicalizados, especialmente quando aliado à estabilidade produtiva em sistemas com iluminação artificial. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho morfofisiológico, nutricional e produtivo de quatro genótipos de alface: a cultivar comercial *Grand Rapids* (não tropicalizada) e as linhagens UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1 e UFU Biofort (tropicalizadas). Os genótipos foram submetidos a diferentes espectros de luz LED (vermelho, azul, branco e à junção dos três anteriores, sendo RBW em sistema aeropônico vertical, cultivados em ambiente *indoor*. Foram feitas avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, parâmetros agrônômicos e determinação da composição nutricional. Os resultados evidenciaram interação significativa entre os fatores estudados, demonstrando que a luz branca elevou a eficiência quântica (F_v/F_m) nas linhagens UFU-155#1#1#1 e UFU-189#1#2#1 (médias superiores a 0,80), enquanto a luz vermelha reduziu o índice de desempenho (P_i_Abs) na linhagem UFU-Biofort para valores próximos a 1,5. Agronomicamente, a luz vermelha maximizou a massa fresca total e o diâmetro da planta, apesar de reduzir a condutância estomática (g_s). A eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) foi significativamente superior na linhagem UFU-189#1#2#1 sob luz vermelha (114,8 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$), favorecida pelo aumento da massa foliar específica e espessura foliar (0,37 mm). A linhagem UFU-189#1#2#1 destacou-se sob o espectro RBW, apresentando teores elevados de Mg (7,45 g kg^{-1}), Mn (292 mg kg^{-1}) e Zn (605,37 mg kg^{-1}). O espectro vermelho promoveu crescimento em extensão, porém induziu estresse fisiológico e redução fotossintética, enquanto os espectros Azul e RBW otimizaram o aparato estomático, com densidades estomáticas superiores a 800 mm^2 na face abaxial, elevando os teores de clorofila e a biofortificação nutricional. As linhagens tropicalizadas UFU-Biofort e UFU-189#1#2#1 apresentaram maior aptidão para o cultivo indoor e eficiência fotoquímica, superando a cultivar comercial *Grand Rapids* em robustez estrutural e densidade nutricional, com níveis de biofortificação considerados relevantes para o consumo humano e a segurança alimentar.

Palavras-chave: Iluminação artificial. Biofortificação mineral. Biofortificação. Fazendas Urbanas. Estresse fotooxidativo.

ABSTRACT

RODRIGUES, BRUNO DOURADO. Goiano Federal Institute – Rio Verde Campus – GO, February 2026. **Agronomic biofortification of tropicalized lettuces under different LED light spectra.** Advisor: Dr. Fabiano Guimarães Silva. Co-advisors: Dr. Fabia Barbosa da Silva and Dr. Ana Carolina Silva Siquieroli.

Vertical cultivation of vegetables represents a strategic alternative for food security in the face of climate change. Despite technological advances, there is still a gap in the scientific literature regarding the biofortification potential of tropicalized genotypes, especially when combined with productive stability in systems with artificial lighting. The objective of this study was to evaluate the morphophysiological, nutritional, and productive performance of four lettuce genotypes: the commercial cultivar Grand Rapids (non-tropicalized) and the lines UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1, and UFU Biofort (tropicalized). The genotypes were subjected to different LED light spectra (red, blue, white and the combination of the three previous ones, being RBW)) in a vertical aeroponic system cultivated indoors. Evaluations were made of gas exchange, chlorophyll a fluorescence, agronomic parameters, and determination of nutritional composition. Results showed a significant interaction between the studied factors, demonstrating that the light increased quantum efficiency (F_v/F_m) in the UFU-155#1#1#1 and UFU-189#1#2#1 lines (averages above 0.80), while red light reduced the performance index (P_i_Abs) in UFU-Biofort to values close to 1.5. Agronomically, red light maximized total fresh mass and plant diameter, despite reducing stomatal conductance (g_s). The intrinsic efficiency of water use (A/g_s) was significantly higher in UFU-189#1#2#1 under red light ($114.8 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$), favored by the increase in specific leaf mass and leaf thickness (0.37 mm). The UFU-189#1#2#1 line stood out under the RBW spectrum, presenting high levels of Mg (7.45 g kg^{-1}), Mn (292 mg kg^{-1}), and Zn ($605.37 \text{ mg kg}^{-1}$). The red spectrum promoted growth in length but induced physiological stress and reduced photosynthesis, while the blue and RBW spectra optimized the stomatal apparatus, with stomatal densities exceeding 800 mm^2 on the abaxial surface, increasing chlorophyll levels and nutritional biofortification. The tropicalized lines UFU-Biofort and UFU-189#1#2#1 showed greater suitability for indoor cultivation and photochemical efficiency, surpassing the commercial cultivar Grand Rapids in structural robustness and nutritional density, with levels of biofortification considered relevant for human consumption and food safety.

Keywords: Artificial lighting. Mineral biofortification. Biofortification. Urban farms. Photo-oxidative stress.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A alface (*Lactuca sativa* L.) consolida-se como a hortaliça folhosa de maior relevância econômica e consumo global, servindo como espécie modelo para o desenvolvimento de tecnologias em ambiente controlado em razão do seu ciclo fenológico curto, arquitetura compacta e alta responsividade a estímulos ambientais (Budavári et al., 2024; Arcel et al., 2023). Entretanto, a produção em larga escala sob sistemas convencionais enfrenta gargalos significativos, decorrentes da instabilidade climática e da elevada pressão de pragas (Castellanos; Gracia; Guimaraes, 2023; Dresch et al., 2025). Essa origem genética impõe limitações sob altas temperaturas, resultando em pendoamento precoce e maior incidência de queima de bordos (*tipburn*), desordem causada pela deficiência localizada de cálcio em tecidos jovens sob alta taxa de crescimento. Tais limitações exigem a transição para modelos produtivos e genótipos que consigam tolerar essas variações climáticas (Miranda et al., 2025; Shultz et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

De forma paralela, como essa cultura é produzida globalmente e depende estritamente de condições climáticas favoráveis, a segurança nutricional urbana é ameaçada pela "fome oculta", fenômeno em que a ingestão calórica é mantida, mas há carência de micronutrientes (Sanches et al., 2025; Kumar et al., 2024). Neste contexto, torna-se essencial identificar genótipos que integrem resiliência ambiental e superioridade nutricional (Matysiak et al., 2022; Ahmed et al., 2022), fundamentando a avaliação das linhagens tropicalizadas UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1 e UFU-Biofort (Siquieroli et al., 2025). Tais materiais são distinguidos pela robustez morfogênética, que previne o pendoamento precoce frente às variações de temperatura e luminosidade (Miranda et al., 2025).

Concomitantemente a isso, a biofortificação genética otimiza a partição de fotoassimilados ao aumentar a síntese de transportadores de membrana e ligantes orgânicos que auxiliam na absorção e a translocação de minerais para os tecidos (Siquieroli et al., 2025). Esse processo induz maior acúmulo de nutrientes e biomassa ao reduzir o custo energético do metabolismo basal, garantindo eficiência produtiva mesmo sob variações na qualidade e na intensidade de fótons (Gavhane et al., 2023; Miranda et al., 2025). Diante da dificuldade em manter a estabilidade luminosa em campo aberto, a implementação de sistemas de cultivo vertical tem emergido como uma tecnologia estratégica para a produção dessa cultura. Esse modelo permite mitigar estresses abióticos e maximizar o potencial genético das linhagens pelo uso otimizado da iluminação artificial LED (Kim et al., 2024; Sinaga et al., 2023).

A qualidade espectral atua como um modulador morfogênico e bioquímico, em que diferentes comprimentos de onda acionam rotas metabólicas distintas via sinalização de fotorreceptores (Jaya; Putra; Sofi'i, 2023; Kaveesha; Perera; Silva, 2023). Na cultura da alface, a luz vermelha estimula a expansão da área foliar e o acúmulo de biomassa, contudo, a inclusão estratégica de fótons azuis e espectros mistos (RBW, vermelho, azul e branco) é determinante para a manutenção da homeostase fisiológica e o aumento da densidade nutricional. Essa interação espectral potencializa a biofortificação ao induzir a atividade de enzimas antioxidantes e transportadores de íons, mecanismos essenciais para a absorção eficiente de micronutrientes e estabilidade do aparato fotossintético (Gomez; Iersel; Ferrarezi, 2024; Zou et al., 2025). O sincronismo entre genética tropicalizada e iluminação artificial em fazendas verticais é, portanto, o pilar central para a segurança alimentar urbana. No entanto, é necessário considerar a volatilidade dos custos de produção, que acompanham os avanços na eficiência energética dos sistemas de iluminação e automação (Mäkinen et al., 2025; Totosa et al., 2023).

Além das respostas bioquímicas, a compreensão das alterações morfoanatômicas foliares é determinante para elucidar a aclimação aos tratamentos. Atributos como massa foliar específica, espessura e densidade dos tecidos regem a eficiência da interceptação luminosa e a modulação da condutância estomática (Poorter et al., 2009; Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Lei et al., 2022). Tais atributos funcionais refletem a plasticidade fenotípica dos genótipos, indicando se o investimento energético é direcionado para a construção de barreiras contra o estresse foto-oxidativo ou para a expansão foliar (Li et al., 2021; Qiao et al., 2025; Witkowski; Lamont, 1991). Na literatura, a modulação dessas características sob diferentes espectros LED é reconhecida

como um mecanismo de aclimação que dita a capacidade de suporte à biofortificação nutricional e à estabilidade hídrica (Pennisi et al., 2019; Soufi et al., 2024). Assim, a análise conjunta dessas variáveis morfológicas permite identificar estratégias adaptativas que assegurem a estabilidade produtiva das linhagens tropicalizadas em sistemas de agricultura vertical.

Nesse cenário, a identificação de materiais que aliem alto desempenho produtivo nutricional torna-se imperativa para a viabilização econômica e social das fazendas verticais. Assim, a relevância deste estudo reside na seleção de genótipos que apresentem adaptação fisiológica superior em ambiente controlado, sendo capazes de converter o aporte tecnológico da iluminação artificial LED em aumento real de desempenho agrônomo. Ao investigar essas interações morfofisiológicas, busca-se validar linhagens tropicalizadas que otimizem o uso de recursos e promovam a biofortificação.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, H. A. et al. Effect of light intensity and air velocity on the thermal exchange of *indoor*-cultured lettuce. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 63, n. 3, p. 375-390, 2022.

ARCEL, M. M. et al. Optimizing lettuce yields and quality by incorporating movable downward lighting with a supplemental adjustable sideward lighting system in a plant factory. **PeerJ**, v. 11, p. e15401, 2023.

BUDAVÁRI, N. et al. An overview on the use of artificial lighting for sustainable lettuce and microgreens production in an *indoor* vertical farming system. **Horticulturae**, v. 10, n. 9, p. 938, 2024.

CASTELLANOS, L. F. L.; GRACIA, L. M. N.; GUIMARAES, A. C. Light energy efficiency in lettuce crop: Structural *indoor* designs simulation. **Plants**, v. 12, n. 19, p. 3456, 2023.

DRESCH, C. et al. A Rotational Cultivation System for *Indoor*-Grown Lettuce: Feasibility in Terms of Yields, Resource Efficiency, Quality, and Postharvest Storage Capacity. **Agronomy**, v. 15, n. 3, p. 744, 2025.

GAVHANE, K. P. et al. Determination of optimal daily light integral (DLI) for *indoor* cultivation of iceberg lettuce in an indigenous vertical hydroponic system. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 10923, 2023.

GOMEZ, A. M.; IERSEL, M. W. V.; FERRAREZI, R. S. Varying Light Intensities Affect Lettuce Growth and Physiology in Controlled *Indoor* Environments. **Horticulturae**, v. 10, n. 9, 2024.

JAYA, M. H. I. S.; PUTRA, S. D.; SOFTI, I. Effect of Light Spectrum LED Lettuce on IoT-Based *Indoor* Farming. **Biotropika: Journal of Tropical Biology**, v. 11, n. 1, p. 38-43, 2023.

KAVEESHA, D. M. P. C.; PERERA, T. A.; SILVA, L. N. C. Optimizing *Indoor* Lettuce Cultivation: Evaluating the Impact of Artificial Light and Parameter Monitoring Using an IoT Device. *In*: WORLD CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS FOR BUSINESS MANAGEMENT. **Proceedings...** Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 401-412.

KIM, H. D. et al. Effect of artificial light source on the growth and quality of lettuce. **Journal of Environmental Science International**, v. 33, n. 6, p. 383-402, 2024.

KUMAR, J. et al. Biofortification of Triticum species: a stepping stone to combat malnutrition. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p. 668, 2024.

LEE, J. H. et al. Changes in spectral reflectance, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, and growth of mini green romaine lettuce according to various light qualities in *indoor* cultivation. **Horticulturae**, v. 10, n. 8, p. 860, 2024.

MÄKINEN, A. et al. Photosynthetic adjustments maintain lettuce growth under dynamically changing lighting in controlled *indoor* farming setups. **Physiologia Plantarum**, v. 177, n. 4, p. e70405, 2025.

MATYSIAK, B. et al. Yield and quality of romaine lettuce at different daily light integral in an *indoor* controlled environment. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1026, 2022.

MIRANDA, G. V. et al. Sustainable hydroponic lettuce production with artificial lighting and different nutritional irrigation parameters. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 85, n. 3, p. 299-307, 2025.

SANCHES, A. A. et al. Selection of lettuce hybrids to generate productive carotenoid-biofortified populations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 4, p. e278163, 2025.

SHULTZ, R. C. et al. Evaluation of different artificial light technologies for *indoor* aquaponic production of Bibb lettuce, *Lactuca sativa* var. *capitata*, and compact basil, *Ocimum basilicum* var. *Genovese*. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 53, n. 3, p. 703-713, 2022.

SINAGA, A. N. K. et al. Hydroponic NFT-based *indoor* farming of red and green lettuce microgreens in response to artificial lighting. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART AND INNOVATIVE AGRICULTURE (ICoSIA)*, 3., 2022. **Proceedings...** Atlantis Press, 2023. p. 625-634.

SIQUIEROLI, A. C. S. et al. Tropicalized lettuce: photosynthetic efficiency, water use, and agronomic–nutritional potential. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 1380, 2025.

TOTOSA, A. T. et al. Light spectrum effects on rocket and lamb's lettuce cultivated in a vertical *indoor* farming system. **Scientia Horticulturae**, v. 321, p. 112221, 2023.

ZOU, J. et al. Effects of different light intensities on lettuce growth, yield, and energy consumption optimization under uniform lighting conditions. **PeerJ**, v. 13, p. e19229, 2025.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho morfofisiológico, nutricional e produtivo de quatro genótipos de alface, a cultivar comercial Grand Rapids (não tropicalizada) e as linhagens UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1 e UFU-Biofort (tropicalizadas), cultivadas em sistema vertical aeropônico sob diferentes espectros de luz LED (vermelho, azul, branco e RBW).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificar o crescimento e a morfologia foliar sob a hipótese de que a luz vermelha prioriza a expansão da área foliar em detrimento da robustez estrutural.
- Avaliar o conteúdo de pigmentos e compostos bioativos, testando se espectros de alta energia (Azul e RBW) induzem a síntese de clorofilas como mecanismo de fotoproteção.
- Analisar a composição nutricional foliar sob a premissa de que a modulação estomática via espectro RBW potencializa a absorção e a translocação de macro e micronutrientes.
- Investigar a interação genótipo x espectro sob a hipótese de que a plasticidade fenotípica das linhagens biofortificadas permite ajustes fisiológicos superiores na eficiência quântica e hídrica.

CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Horticultural Plant Journal)

Sem tropicalização, sem ganho: espectros de luz LED modulam a estabilidade fotoquímica e a biofortificação nutricional de genótipos tropicalizados de alface em agricultura vertical

No tropicalization! No gain!: LED light spectra modulate photochemical stability and nutritional biofortification in tropicalized lettuce genotypes under vertical farming

Bruno Dourado Rodrigues¹

Resumo

O cultivo vertical de hortaliças representa uma alternativa estratégica para a segurança alimentar frente às mudanças climáticas. Apesar do avanço tecnológico, ainda se observa uma lacuna na literatura científica em relação ao potencial de biofortificação de genótipos tropicalizados, especialmente quando aliado à estabilidade produtiva em sistemas com iluminação artificial. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho morfofisiológico, nutricional e produtivo de quatro genótipos de alface, a cultivar comercial *Grand Rapids* (não tropicalizada) e as linhagens UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1 e UFU Biofort (tropicalizadas). Os genótipos foram submetidos a diferentes espectros de luz LED (vermelho, azul, branco e a junção dos três anteriores, sendo RBW) em sistema aeropônico vertical, cultivados em ambiente *indoor*. Foram feitas avaliações de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, parâmetros agronômicos e determinação da composição nutricional. Os resultados evidenciaram interação significativa entre os fatores estudados, demonstrando que a luz branca elevou a eficiência quântica (F_v/F_m) nas linhagens UFU-155#1#1#1 e UFU-189#1#2#1 (médias superiores a 0,80), enquanto

¹ Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Mestrando em Ciências Agrárias pelo Instituto Federal Goiano (IF Goiano) – Campus Rio Verde. E-mail: brunodover01@gmail.com

a luz vermelha reduziu o índice de desempenho (Pi_Abs) na UFU-Biofort para valores próximos a 1,5. Agronomicamente, a luz vermelha maximizou a massa fresca total e o diâmetro da planta, apesar de reduzir a condutância estomática (g_s). A eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) foi significativamente superior na UFU-189#1#2#1 sob luz vermelha (114,8 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$), favorecida pelo aumento da massa foliar específica e espessura foliar (0,37 mm). A linhagem UFU-189#1#2#1 destacou-se sob o espectro RBW, apresentando teores elevados de Mg (7,45 g kg^{-1}), Mn (292 mg kg^{-1}) e Zn (605,37 mg kg^{-1}). O espectro vermelho promoveu o crescimento em extensão, porém induziu estresse fisiológico e redução fotossintética, enquanto os espectros Azul e RBW otimizaram o aparato estomático, com densidades estomáticas superiores a 800 mm^2 na face abaxial, elevando os teores de clorofila e a biofortificação nutricional. As linhagens tropicalizadas UFU-Biofort e UFU-189#1#2#1 apresentaram maior aptidão para o cultivo indoor e eficiência fotoquímica, superando a cultivar comercial Grand Rapids em robustez estrutural e densidade nutricional, com níveis de biofortificação considerados relevantes para o consumo humano e a segurança alimentar.

Palavras-chave: Iluminação artificial. Biofortificação mineral. Biofortificação. Fazendas Urbanas. Estresse fotooxidativo.

3.1 INTRODUÇÃO

A intensificação das mudanças climáticas, somada à irregularidade dos ciclos hídricos e à crescente urbanização global, gera uma vulnerabilidade para a segurança alimentar e a sustentabilidade da agricultura convencional (FAO et al., 2023). Nesse cenário, a progressiva ascensão das temperaturas médias em climas tropicais, em decorrência do aquecimento global, compromete a estabilidade produtiva de hortaliças pela sua sensibilidade fisiológica a variações térmicas (IPCC, 2023; Purquerio et al., 2024). Modelagens climáticas indicam que o cultivo tradicional em campo aberto poderá se tornar inviável em diversas áreas do território brasileiro até o final do século XXI (Embrapa, 2025). Nesse contexto, o crescimento da agricultura vertical *indoor* consolida-se como uma alternativa, garantindo a estabilidade e a continuidade operacional das colheitas ao longo de todo o ano (Orsini et al., 2020; Benke; Tomkins, 2017).

A alface (*Lactuca sativa* L.) é a hortaliça folhosa de maior consumo mundial e a principal espécie em fazendas verticais devido à sua arquitetura compacta e ciclo fenológico curto (Arachchige et al., 2024). Embora a alface (*Lactuca sativa* L.) apresente alta adaptabilidade à agricultura vertical, seu cultivo em ambiente controlado frequentemente enfrenta o desafio da baixa densidade nutricional, fator determinante para a persistência da fome oculta em populações humanas, caracterizada pela carência crônica de micronutrientes em dietas caloricamente suficientes (Chen et al., 2016; Pennisi et al., 2019). Adicionalmente, essa defasagem nutricional atua como um fator determinante para

a persistência da “fome oculta”, agravando carências minerais silenciosas que comprometem o desenvolvimento e a saúde das populações urbanas (Sanches et al., 2025; Kumar et al., 2024).

Diversos estudos priorizam majoritariamente as composições espectrais como fatores físicos isolados, assumindo respostas biológicas homogêneas entre genótipos (Pennisi et al., 2019; Qiao et al., 2025; Nájera et al., 2023; Soufi et al., 2024). Nesse cenário, subestima-se o papel da variabilidade genética, elemento que rege a plasticidade fenotípica e coordena as respostas de aclimação nos âmbitos fotoquímico, morfológico e nutricional (Li et al., 2021; Siquieroli et al., 2025). Embora a qualidade espectral atue como sinal regulatório via fotorreceptores, o diferencial das linhagens tropicalizadas e biofortificadas reside em sua maior eficiência na transdução desses sinais, o que induz ajustes mais finos na síntese de pigmentos e na modulação enzimática (Smith et al., 2017; Pennisi et al., 2019). Essa robustez genética permite que o metabolismo energético seja otimizado, evitando o pendoamento precoce e garantindo que a partição de fotoassimilados seja direcionada prioritariamente para o acúmulo de biomassa e minerais (Moraes et al., 2022; Kumar et al., 2024).

Além das respostas bioquímicas, a compreensão das alterações morfoanatômicas foliares é determinante, tendo em vista que características como massa foliar específica e espessura definem a eficiência na interceptação luminosa e na regulação estomática (Poorter et al., 2009; Lei et al., 2022). Esses atributos refletem a plasticidade fenotípica e as estratégias de aclimação sob LEDs, ditando a capacidade de suporte à biofortificação e à estabilidade hídrica (Li et al., 2021; Soufi et al., 2024). Sob essa ótica, a identificação de genótipos que integrem desempenho produtivo e densidade nutricional torna-se imperativa para a otimização de resultados em fazendas verticais. Por conseguinte, a relevância deste estudo reside na validação de linhagens tropicalizadas aptas a converter o aporte tecnológico em desempenho agrônomo superior e biofortificação mineral efetiva, atendendo às demandas contemporâneas por segurança alimentar e saúde pública.

Diante da vulnerabilidade climática e do imperativo da segurança nutricional, a compreensão da interação entre a base genética e a qualidade espectral se faz necessária. Assume-se a hipótese de que a utilização de espectros de luz LED com maior proporção de fótons azuis e composições mistas (RBW) induz ajustes morfoanatômicos e fisiológicos superiores em linhagens de alface tropicalizadas, os quais mitigam o estresse foto-oxidativo e otimizam a condutância estomática, resultando em uma maior eficiência no uso da água e na potencialização da absorção estequiométrica de micronutrientes em

relação aos genótipos de clima temperado. Por consequência, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho morfofisiológico, nutricional e produtivo de quatro genótipos de alface, a cultivar comercial *Grand Rapids* (não tropicalizada) e as linhagens UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1 e UFU Biofort (tropicalizadas), cultivadas em sistema vertical aeropônico sob diferentes espectros de luz LED (vermelho, azul, branco e RBW), visando a selecionar materiais com melhor adaptação ao cultivo vertical e superior desempenho agrônomico e nutricional.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Material genético e condições experimentais

3.2.1.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Estudos Avançados em Agricultura Vertical, vinculado ao Instituto Federal Goiano, localizado no município de Rio Verde, Goiás, Brasil. O local encontra-se nas coordenadas geográficas 17°48'16,4" S e 50°54'21,3" W, com 748m de altitude média, inserido na região Sudoeste do estado de Goiás.

3.2.1.2 Produção das mudas

Foram avaliados quatro genótipos de alface: as linhagens tropicalizadas UFU-Biofort, UFU-155#1#1#1 e UFU-189#1#2#1 e a cultivar comercial *Grand Rapids* (não tropicalizada), utilizada como controle. Os genótipos integram o Banco de Germoplasma de Alfaves da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), registrados no software BG α BIOFORT. Essas linhagens foram obtidas pela hibridação entre as linhagens Belíssima (Pira 72) e Uberlândia 10.000 (genótipo com teores elevados de carotenoides) (Souza et al., 2007; Sanches et al., 2025), seguida de oito ciclos sucessivos de autofecundação realizados entre 2013 e 2020, conduzidos pelo método genealógico (Maciel et al., 2019; Maciel et al., 2020; Clemente et al., 2021; Clemente et al., 2023; Ribeiro et al., 2023).

Para a obtenção das mudas, realizou-se o semeio em bandejas de poliestireno expandido de 200 células, preenchidas com substrato à base de fibra de coco (CarolinaSoil®). Durante essa fase, as bandejas foram mantidas em ambiente controlado

sob iluminação LED branca, com intensidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) de $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ conforme recomendado por Gomez, Iersel e Ferrarezi (2024) e Gharedaghloo e Najafpour (2025). As avaliações da qualidade e intensidade espectral foram feitas por um espectrômetro portátil, modelo LI-180 (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA). Aos 15 DAS, quando as plântulas apresentavam quatro folhas verdadeiras, foi feita a seleção com base na uniformidade de altura e vigor, procedendo-se ao transplântio para os módulos de cultivo, isolados do sistema vertical aeropônico.

3.2.1.3 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial 4x4, integrando quatro espectros de luz (branco, vermelho, azul e a combinação RBW) e quatro genótipos de alface. Cada cabine de cultivo foi estabelecida como um bloco, totalizando quatro repetições, em que a planta individual constituiu a unidade experimental. Adotou-se o espaçamento de 0,3 m entre suportes e 0,2 m entre plantas (Figura 1).

3.2.1.4 Estrutura das unidades de cultivo e condições experimentais

Foram utilizados quatro módulos experimentais de cultivo, Figura 1, isolados entre si, cada um equipado com um espectro de luz distinto: branco, vermelho, azul e RBW (vermelho, azul e branco na proporção 3:1:1), conforme apresentado na Figura 2. Cada cabine tinha dimensões de 2,00 m x 0,75 m x 1,00 m (comprimento x largura x altura). Durante os dois primeiros dias de aclimação, a intensidade luminosa foi mantida em $150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo ajustada para $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a partir do terceiro dia, como descrito por Yan et al. (2020). O fotoperíodo foi de 14h, correspondendo a uma DLI (integral diária de luz) de $12,6 \text{ mol m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (Gomez; Iersel; Ferrarezi, 2024; Totosa et al., 2023). As condições ambientais foram controladas, com temperatura média de $24 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de, aproximadamente, 65%.



Figura 1. Módulos experimentais de cultivo aeropônico de alface (*Lactuca sativa* L.) sob diferentes qualidades espectrais (Branco, Azul, Vermelho e RBW).

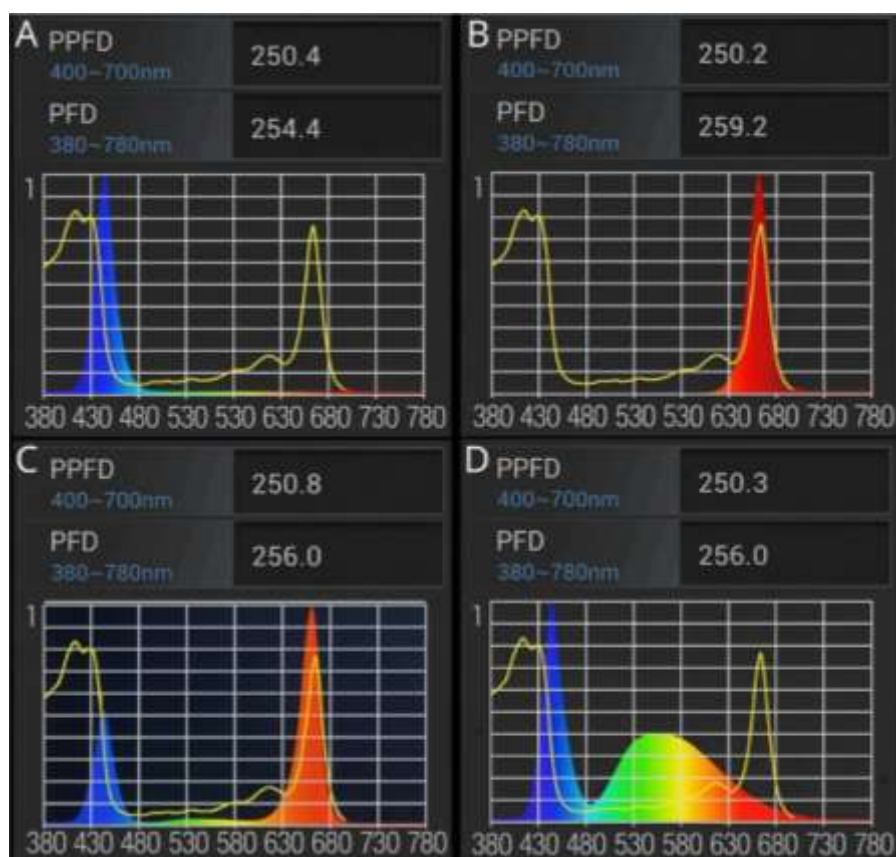


Figura 2. Perfil espectral e densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) dos tratamentos luminosos, obtidos via espectrômetro portátil LI-180 (LI-COR Biosciences): Azul (A), Vermelho (B), RBW (C) e Branco (D).

3.2.1.5 Solução nutritiva e condução do cultivo

Nos módulos de cultivo isolados experimentais, as plantas foram cultivadas em sistema aeropônico em perfis de PVC com 150 mm de diâmetro, dispostos horizontalmente. As raízes foram mantidas em suspensão e receberam solução nutritiva por meio de bicos nebulizadores acoplados a canos de 32 mm, espaçados a cada 9 cm. A aplicação da solução ocorreu em ciclos de 1 min a cada 5 min, totalizando 14h diárias de funcionamento ativo (das 07h00 às 21h00). Para evitar desidratação radicular durante a noite, foi adicionado um ciclo extra de 2 min às 03h00. O fornecimento hídrico e nutricional foi automatizado via Solução N3, com equilíbrio iônico de 65% NO_3^- e 35% NH_4^+ (Guedes et al., 2024). A nutrição foi viabilizada por duas soluções estoque de 30 L: o Estoque A, composto por Nitrato de Cálcio (985 g), Nitrato de Potássio (960 g) e Ferro-EDDHA (85 g); e o Estoque B, contendo as fontes de macronutrientes Sulfato de Potássio (360 g), Sulfato de Amônio (370 g), Fosfato Monoamônico (880 g) e Sulfato de Magnésio (1480 g). A esta última solução, foram incorporados os micronutrientes na forma de sulfatos de Manganês (3 g), Zinco (4 g) e Cobre (1 g), além de Molibdato de Sódio (1 g) e Bórax (10 g). Essa composição permitiu a manutenção da estabilidade química e do pH, mantido a 5,6, e do EC, mantido em 1,3, sendo renovada a cada 15 dias, sem adoção de controle térmico da solução.

3.2.2 Avaliações

Após 25 dias do transplântio, quando as plantas atingiram o estágio horticultural comercial, foram avaliadas as características agronômicas, fisiológicas, bioquímicas e a composição de nutrientes.

3.2.2.1 Parâmetros agronômicos

Para a avaliação da morfologia e do desempenho produtivo das plantas, foram consideradas a massa fresca total (MFT) (kg) e a massa fresca foliar (MFF) (kg), determinadas por pesagem em balança de precisão; o comprimento do caule (CC) (cm) e o comprimento da raiz (CR) (cm) foram avaliados com fita métrica graduada; e o diâmetro da planta (DP) (cm) bem como a espessura do limbo foliar (mm) medida em cinco pontos distintos e a espessura do pecíolo (mm) aferida em três pontos equidistantes foram mensurados com paquímetro, seguindo os procedimentos de parâmetros agronômicos de crescimento descritos por Benincasa (2003). A área foliar (AF) (cm^2) foi

determinada por digitalização das folhas e processamento das imagens por meio do software *ImageJ* (Schneider et al., 2012).

3.2.2.2 Atributos morfoanatômicos foliares

Para a determinação dos caracteres funcionais foliares, foram avaliadas a densidade foliar (D_{foliar}) e a massa foliar específica (LMA), seguindo os protocolos padronizados descritos por Pérez-Harguindeguy et al. (2013). As folhas foram coletadas no terço médio das plantas e hidratadas em água destilada por 24h, em ambiente escuro, para assegurar a turgidez máxima dos tecidos antes da mensuração da área. Em seguida, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 72 °C por 48h e pesadas para a obtenção da massa seca. A massa foliar específica (LMA) foi calculada pela razão entre a massa seca foliar (MSF) e a área foliar (AF). A densidade foliar (D_{foliar}) foi estimada pela razão entre a massa foliar específica e a espessura foliar, conforme proposto por Witkowski e Lamont (1991).

3.2.2.3 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a

As trocas gasosas foram avaliadas utilizando um analisador portátil de fotossíntese por infravermelho (IRGA, modelo LI-6800, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA). As leituras foram feitas no período da manhã, entre 9h00 e 11h00, em folhas completamente expandidas. Durante as avaliações, a câmara foliar foi configurada com densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) constante de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, concentração de CO_2 de 420 ppm e temperatura do bloco ajustada para 25 °C (Figura 3). Foram determinadas a taxa fotossintética líquida (A ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a transpiração (E ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a condutância estomática (g_s ; $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a concentração interna de carbono (C_i ; $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), calculadas com base nas equações propostas por von Caemmerer e Farquhar (1981). Tendo esses dados como referência, foi calculada a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s).



Figura 3. Avaliação das trocas gasosas em plantas de alface, utilizando um analisador de fotossíntese por infravermelho (IRGA, modelo LI-6800).

A fluorescência da clorofila *a* foi mensurada utilizando fluorômetro portátil (modelo FluorPen FP 100, Photon Systems Instruments, Drásov, República Checa). As medições ocorreram nas mesmas folhas utilizadas para as trocas gasosas, após um período de adaptação ao escuro de 30 min, utilizando cliques foliares. A indução da fluorescência transiente e os índices bioenergéticos do Fotossistema II (PSII) foram determinados conforme descrito por Strasser et al. (2000).

3.2.2.4 Conteúdo de clorofilas

O conteúdo de pigmentos fotossintéticos foi quantificado a partir de tecido foliar fresco, visando à determinação dos teores de clorofila *a* e de clorofila *b*. Para a extração, 0,5 g de massa fresca foi macerado e submetido a uma solução composta por éter de petróleo e acetona (1:1 v/v). O material permaneceu em reação por 24 horas sob condições de escuro absoluto, conforme metodologia adaptada de Lichtenthaler (1987).

O extrato sobrenadante teve sua absorbância determinada em espectrofotômetro UV-VIS, utilizando um fotômetro digital de placas Multiskan FC 96 (Thermo Fisher

Scientific Inc., EUA). As leituras foram feitas nos comprimentos de onda de 645, 652 e 663 nm, correspondentes às clorofilas *a* e *b*, respectivamente (Lichtenthaler; Wellburn, 1983;).

3.2.2.5 Nutrientes

A determinação dos teores de nutrientes foi feita em amostras secas em estufa (65 °C) e moídas, submetidas à digestão nitroperclórica, seguindo os protocolos descritos por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

3.5.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade, homogeneidade de variâncias e aditividade. Em seguida, foi feita a análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial 4x4. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%. Todas as análises estatísticas foram feitas no software *R*, versão 4.5.2 (R Core Team, 2024).

A análise de Mapas Auto-Organizáveis (SOM) foi feita utilizando o pacote Kohonen do software *R*, versão 4.5.2 (R Core Team, 2024). As variáveis quantitativas foram previamente padronizadas, com média zero e variância unitária. O SOM foi estruturado com uma camada de entrada totalmente conectada a uma camada de saída, organizada em uma grade hexagonal 6x6. O treinamento ocorreu ao longo de 200 iterações, com inicialização aleatória dos pesos, função de vizinhança gaussiana e métrica de distância euclidiana. Após o treinamento, foram analisados os mapas de componentes, mapas de contagem, qualidade de representação e o agrupamento dos neurônios, possibilitando a identificação de padrões predominantes e a similaridade entre os tratamentos avaliados.

As relações entre as variáveis agronômicas, fisiológicas e nutricionais foram exploradas por meio da Análise de Componentes Principais (PCA). Os dados foram previamente padronizados (z-score) para que todas as variáveis apresentassem média zero e variância unitária, eliminando os efeitos de escala entre as diferentes unidades de medida. A extração dos componentes principais foi baseada em autovalores superiores a 1,0 (Critério de Kaiser), e os resultados visualizados em gráficos do tipo *biplot*, que permitem observar simultaneamente a projeção dos tratamentos (escores) e a contribuição

das variáveis (cargas) nos eixos ortogonais. Todo o processamento estatístico e a geração dos gráficos de PCA foram realizados no software *R* versão 4.5.2 (R Core Team, 2024), utilizando os pacotes FactoMineR e factoextra.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Conteúdo de clorofilas em alfaces sob diferentes espectros de luz LED

A interação entre genótipos de alface e espectros de luz LED foi significativa para os teores de clorofila *a* e clorofila total. Os espectros de luz azul, branca e RBW promoveram maior acúmulo de clorofila *a* e total no genótipo UFU-Biofort, já na cultivar *Grand Rapids*, a luz azul promoveu os maiores teores desses pigmentos, superando todos os demais espectros avaliados (Figura 4A). Para a clorofila *b* e para a razão clorofila *a/b*, observou-se efeito isolado dos fatores. Para clorofila *b*, houve destaque no genótipo UFU-Biofort (Figura 4B) e nos espectros azul, branco e RBW (Figura 4D). A razão clorofila *a/b* foi superior na luz branca em relação à luz vermelha (Figura 4E).

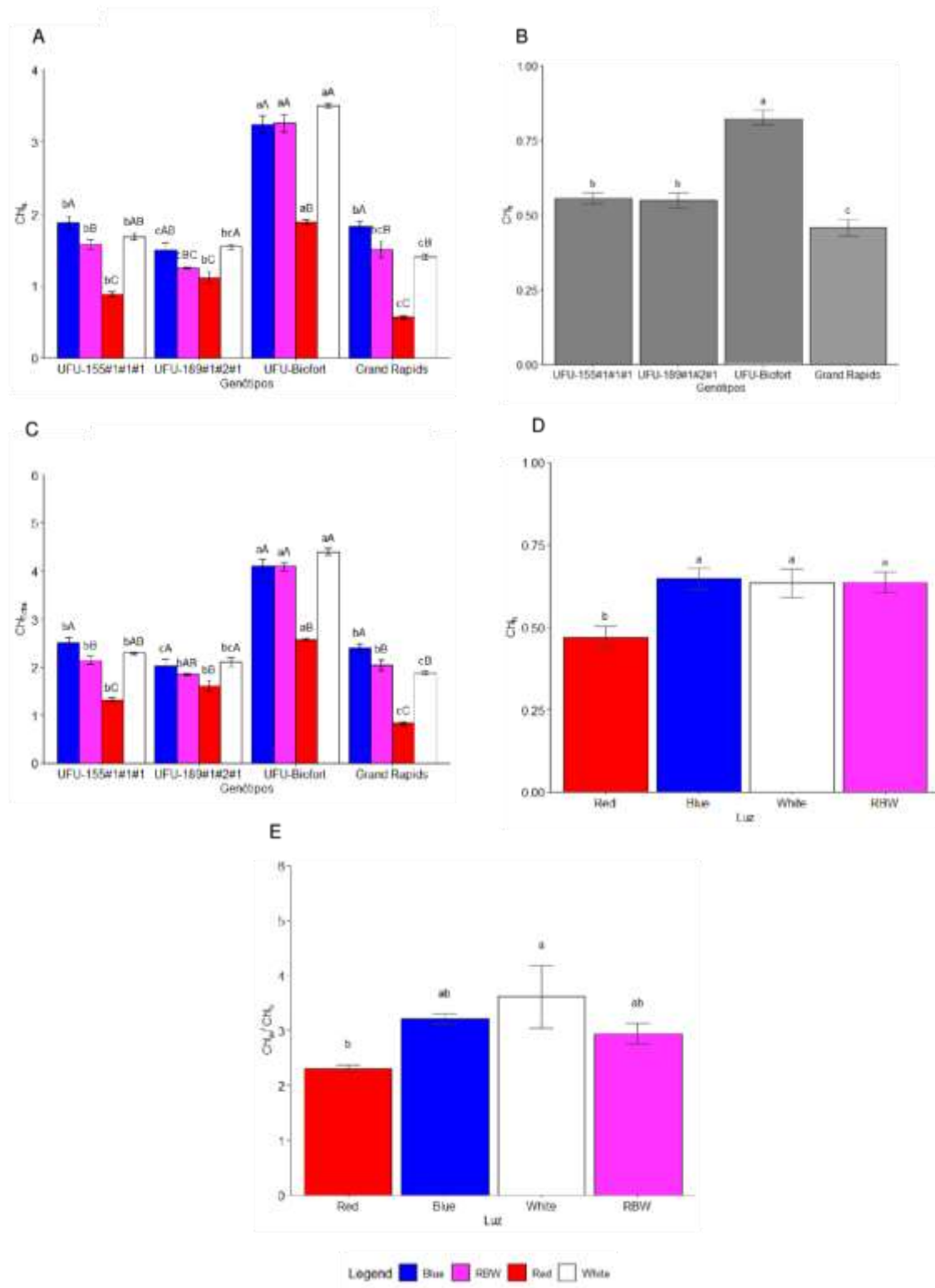


Figura 4. Teores de pigmentos fotossintéticos em linhagens de alface submetidas a diferentes qualidades de luz (mg.g⁻¹ MF) (A) Clorofila *a*; (B) Clorofila *b* – Genótipos; (C) Clorofila Total; (D) Clorofila *b* – Espectros de luz; (E) Razão Clorofila *a/b*. Letras minúsculas comparam genótipos dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo (p<0,05).

3.3.2 Alterações nos parâmetros de fluorescência da clorofila *a*

Houve interação significativa entre genótipos e espectros de luz para os parâmetros de fluorescência de clorofila *a*. A luz branca promoveu maior estabilidade no rendimento quântico máximo do PSII nas linhagens UFU-155#1#1#1 e UFU-189#1#2#1 quando comparadas aos espectros azul e vermelho, enquanto na linhagem UFU-Biofort a luz vermelha promoveu redução desses valores (Figura 5A). Observou-se redução na eficiência fotossintética (Pi_Abs) nas linhagens UFU-155#1#1#1, UFU-189#1#2#1 e UFU-Biofort no espectro vermelho (Figura 5B). A luz azul promoveu menor fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ETo/RC) na linhagem UFU-155#1#1#1 (Figura 5C) em comparação com a luz branca e vermelha; concomitantemente, para ΦEo , a redução significativa foi observada sob luz vermelha na UFU-Biofort (Figura 5D).

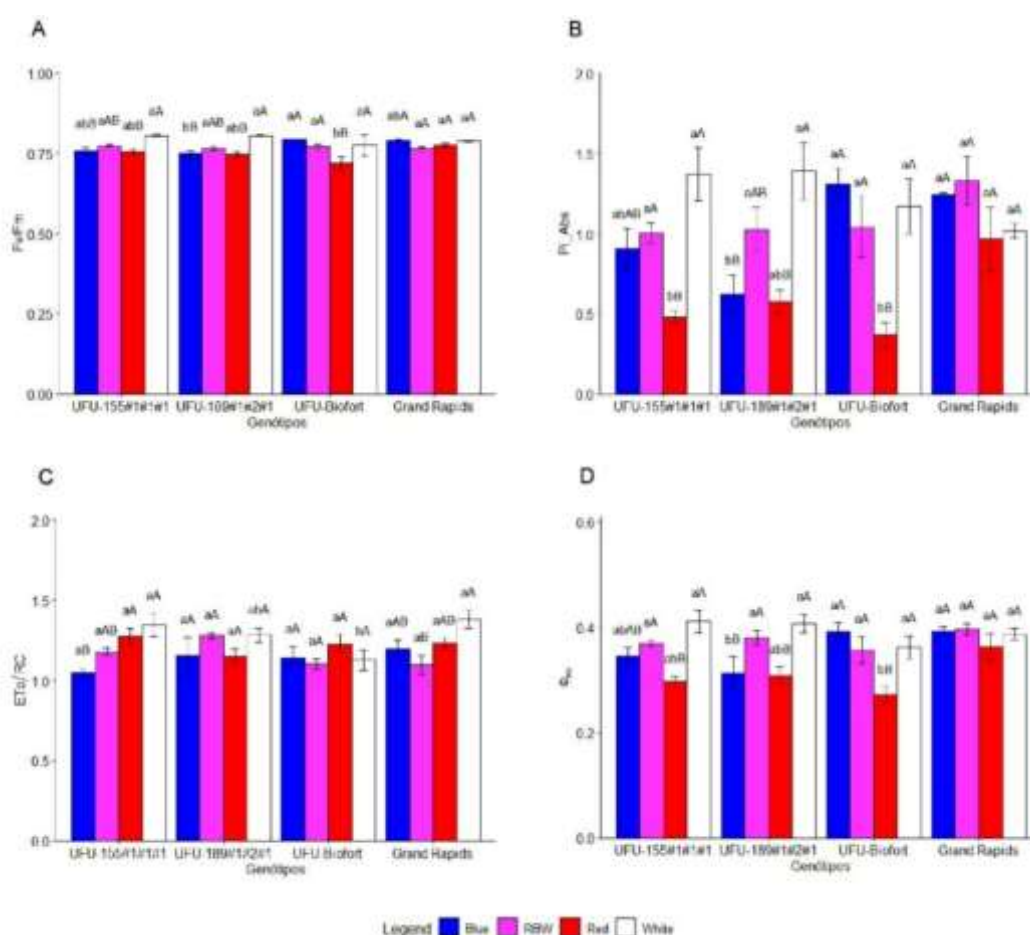


Figura 5. Parâmetros de eficiência da fluorescência da clorofila *a* em linhagens de alfafa sob diferentes espectros de luz. (A) Eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m); (B) Índice de desempenho fotossintético (Pi_Abs); (C) Fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ETo/RC); (D) Rendimento quântico efetivo do transporte de elétrons (ΦEo). Letras minúsculas comparam genótipos dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo (p < 0,05).

Foi observada interação significativa entre genótipos de alface e espectros de luz para os parâmetros de absorção e dissipação de energia fotoquímica. Para o parâmetro ABS/RC, os genótipos UFU-155#1#1#1 e UFU-Biofort apresentaram valores superiores sob luz vermelha (Figura 6A). Em relação ao rendimento quântico da dissipação de energia (Φ_{Do}), a luz vermelha intensificou a dissipação energética no genótipo UFU-Biofort, enquanto a luz branca resultou nos menores valores nos genótipos UFU-155#1#1#1 e UFU-189#1#2#1 (Figura 6B). Entre os genótipos avaliados, o UFU-Biofort, sob luz vermelha, apresentou os maiores fluxos absolutos de energia dissipada (Figura 6C).

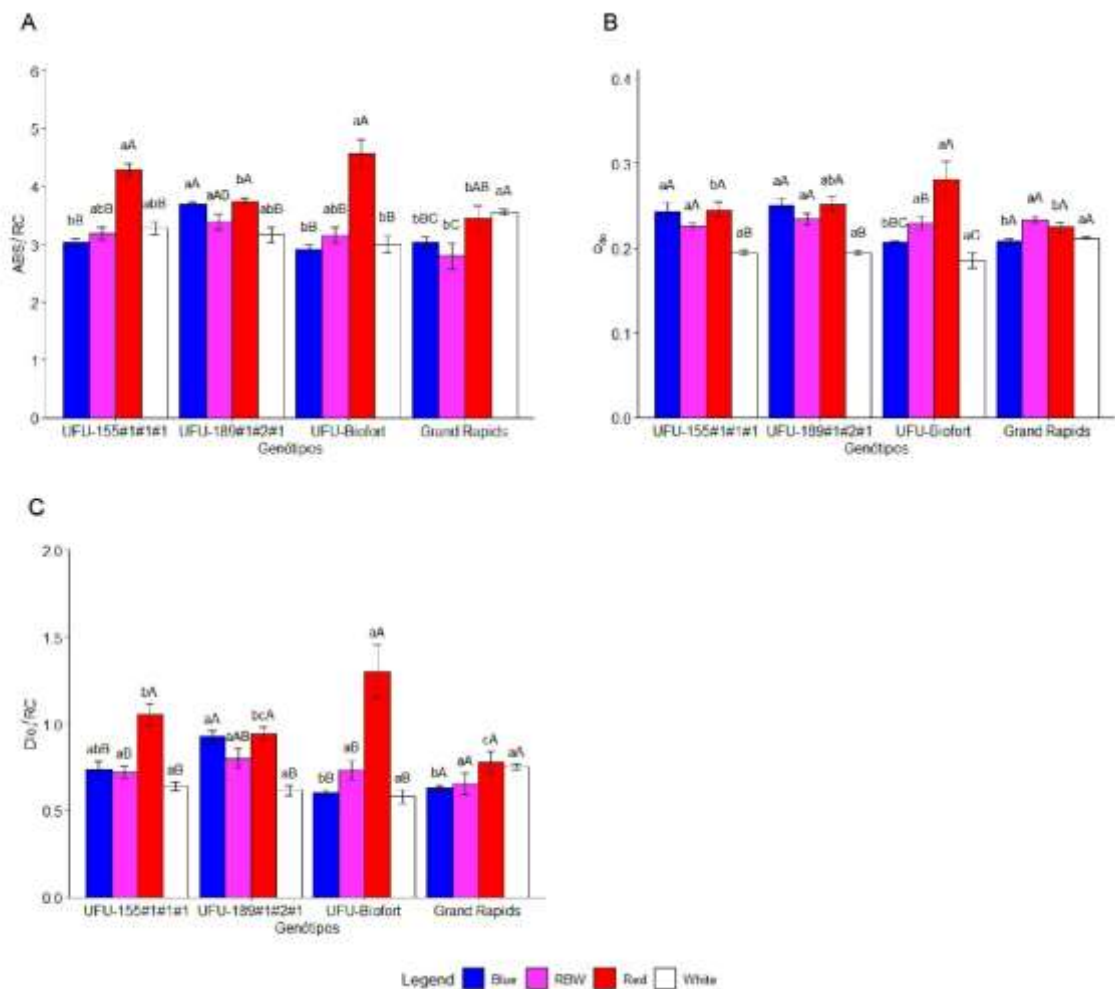


Figura 6. Fluxos específicos de energia e dissipação térmica em folhas de alface cultivadas sob diferentes qualidades de luz. (A) Fluxo de absorção por centro de reação (ABS/RC); (B) Rendimento quântico da dissipação de energia (Φ_{Do}); (C) Fluxo de energia dissipada por centro de reação (DIo/RC). Letras minúsculas comparam genótipos dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo ($p < 0,05$).

3.3 Efeitos da qualidade de luz nas trocas gasosas nas diferentes linhagens

Observou-se interação significativa entre genótipos de alface e espectros de luz para trocas gasosas. A luz vermelha promoveu menores taxas de condutância estomática em todas as linhagens avaliadas; entretanto, no genótipo UFU-Biofort, esses valores não diferiram significativamente daqueles observados sob luz azul (Figura 7A). Para a taxa transpiratória, a cultivar *Grand Rapids* exibiu a maior taxa transpiratória entre os genótipos avaliados sob luz branca, superando significativamente os valores observados nos espectros azul e vermelho (Figura 7B). Para C_i e para a razão C_i/C_a , todas os genótipos apresentaram valores estáveis entre os diferentes espectros de luz, com exceção de UFU-189#1#2#1, que apresentou valores inferiores sob luz vermelha (Figuras 7C e 4E). Para a taxa fotossintética, a luz vermelha apresentou valores inferiores aos demais espectros em todas as linhagens avaliadas (Figura 7D). Para a razão A/g_s , a linhagem UFU-189#1#2#1 apresentou valores superiores sob luz vermelha (Figura 7F).

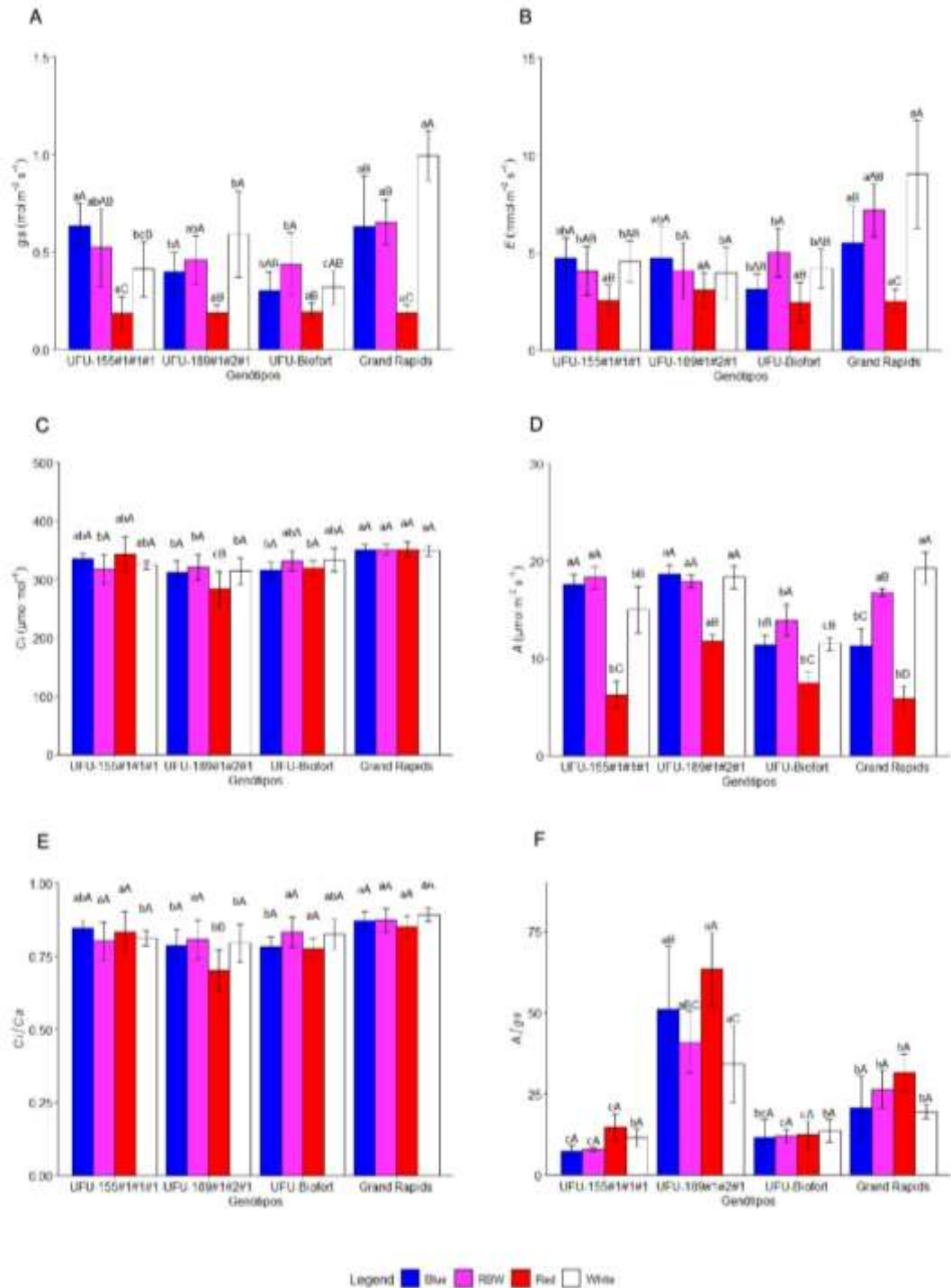


Figura 7. Trocas gasosas e eficiência fisiológica em linhagens de alface sob diferentes espectros de luz. (A) Condutância estomática (g_s); (B) Taxa de transpiração (E); (C) Concentração interna de CO₂ (C_i); (D) Taxa fotossintética líquida (A); (E) Eficiência instantânea de carboxilação (C_i/C_a); (F) Eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s). Letras minúsculas comparam genótipos dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo ($p < 0,05$).

3.3.4 A alteração morfoanatômica nas folhas em resposta a regimes de iluminação

Verificou-se que os atributos relacionados à suculência foliar foram significativamente influenciados pela interação entre genótipos e espectros de luz. A luz vermelha promoveu maior área foliar na cultivar comercial *Grand Rapids* quando comparada aos demais genótipos (Figura 8A). O genótipo UFU-189#1#2#1 apresentou maior espessura foliar em todos os espectros de luz em comparação com os demais (Figura 8B). A densidade foliar (D_{foliar}) foi aumentada pela luz vermelha no genótipo UFU-Biofort, mas foi reduzida na *Grand Rapids*. Adicionalmente, a luz RBW promoveu aumento dessa característica no genótipo UFU-155#1#1#1 (Figura 8C). A luz vermelha reduziu a espessura do pecíolo no genótipo UFU-Biofort, enquanto na *Grand Rapids* a redução ocorreu também sob a luz azul (Figura 8D). A massa foliar específica (LMA) foi reduzida sob luz vermelha nos genótipos UFU-155#1#1#1 e *Grand Rapids*. Na *Grand Rapids*, a luz branca promoveu os maiores valores de LMA, enquanto nos genótipos UFU-189#1#2#1 e UFU-155#1#1#1 o espectro RBW foi superior aos demais (Figura 8E).

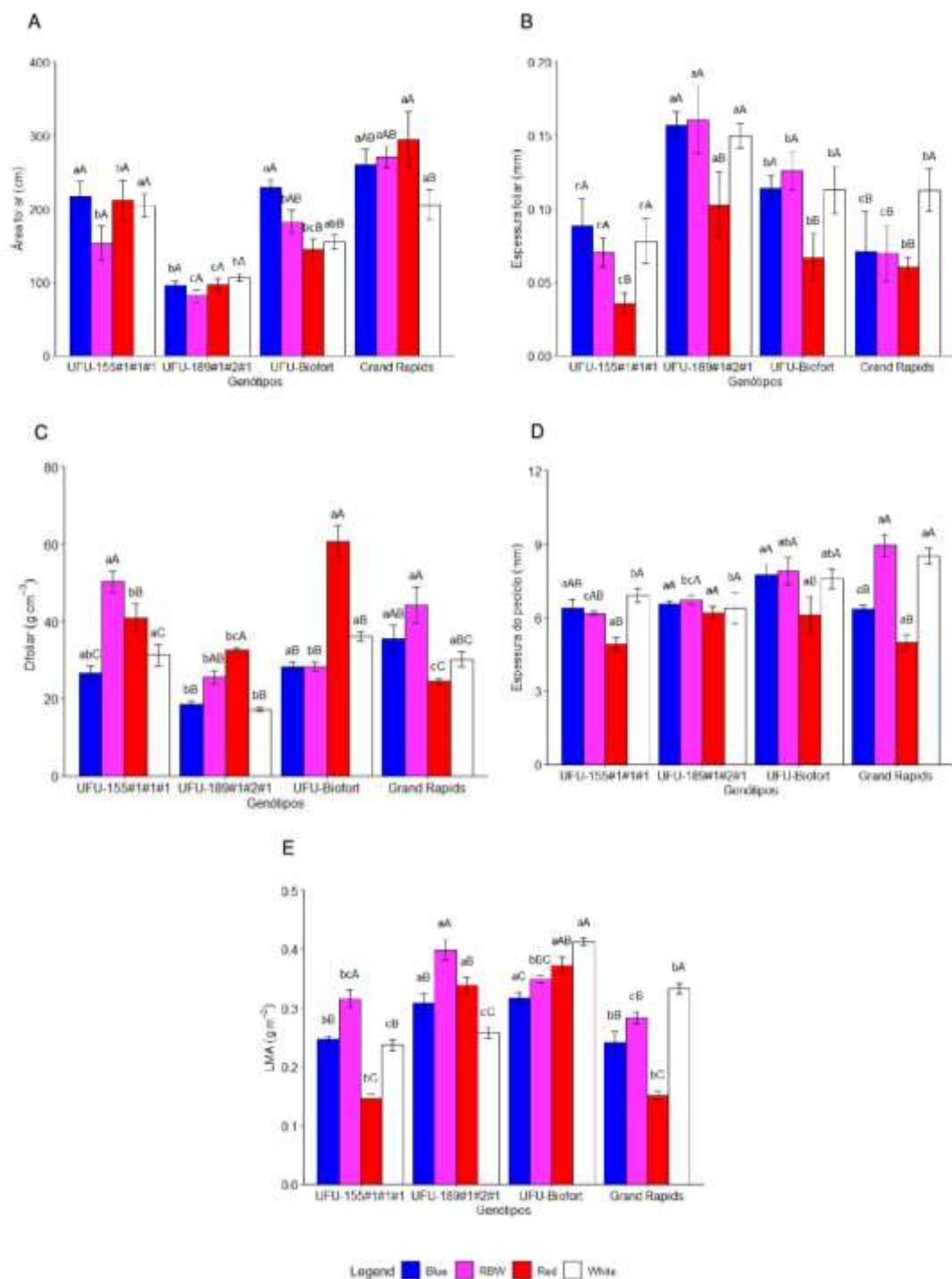


Figura 8. Atributos estruturais de suculência de alface desenvolvidos sob diferentes espectros de luz. (A) Área foliar; (B) Espessura foliar; (C) Densidade foliar; (D) Espessura do pecíolo; (E) Massa foliar específica (LMA). Letras minúsculas comparam linhagens dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo ($p < 0,05$).

3.3.5 Características estomáticas modificadas pela qualidade espectral da luz

Evidenciou efeito significativo da interação entre genótipos e espectros de luz para as características estomáticas avaliadas. Para as variáveis SD e g_{wmax} , os espectros RBW e azul foram superiores aos espectros de luz vermelha e branca, especialmente nos genótipos UFU-Biofort e UFU-189#1#2#1. A luz vermelha apresentou os menores valores para as todas variáveis estomáticas em todos dos genótipos (Tabela 1).

Tabela 1. Características estomáticas (densidade - SD, área - S, condutância máxima teórica - g_{wmax}) avaliadas nas faces adaxial e abaxial de folhas de genótipos de alface submetidos a diferentes qualidades de luz.

Genótipos	Face	Tratamento	SD (mm ²)	S (μm ²)	g_{wmax} (mol m ⁻² s ⁻¹)
UFU-155#1#1#1	Adaxial	Azul	855,48 ± 41,2 aA	5,46 ± 0,28 bB	1,63 ± 0,07 bB
		Vermelho	579,54 ± 31,5 cC	4,50 ± 0,21 cC	1,31 ± 0,05 cC
		Branco	633,58 ± 29,8 cB	6,26 ± 0,24 bA	2,22 ± 0,08 bA
		RBW	783,90 ± 35,6 bA	6,24 ± 0,27 aA	2,29 ± 0,09 aA
	Abaxial	Azul	879,33 ± 44,6 cB	7,07 ± 0,32 bB	1,79 ± 0,08 bB
		Vermelho	606,29 ± 30,1 cC	4,90 ± 0,21 cC	1,24 ± 0,05 cC
		Branco	629,02 ± 28,9 cB	6,26 ± 0,27 bA	2,29 ± 0,09 bA
		RBW	805,13 ± 36,8 bA	6,15 ± 0,29 aA	2,95 ± 0,11 aA
UFU-189#1#2#1	Adaxial	Azul	883,26 ± 44,3 aB	6,48 ± 0,31 aB	1,97 ± 0,08 aB
		Vermelho	635,13 ± 33,9 bC	5,84 ± 0,26 bC	1,37 ± 0,06 cC
		Branco	829,21 ± 38,4 aB	5,44 ± 0,23 bA	2,14 ± 0,07 bA
		RBW	1289,73 ± 52,6 aA	6,22 ± 0,29 aA	2,20 ± 0,09 aA
	Abaxial	Azul	750,43 ± 34,7 aB	6,90 ± 0,30 aB	1,90 ± 0,08 aB
		Vermelho	660,73 ± 31,8 bC	6,01 ± 0,27 bC	1,53 ± 0,06 bC
		Branco	675,64 ± 33,2 aB	5,77 ± 0,26 bA	2,35 ± 0,09 aA
		RBW	815,01 ± 38,6 aA	6,23 ± 0,28 aA	2,46 ± 0,10 aA
UFU-Biofort	Adaxial	Azul	686,54 ± 32,7 bB	6,41 ± 0,30 aB	2,86 ± 0,11 aB
		Vermelho	571,26 ± 28,4 bC	5,93 ± 0,25 bC	2,44 ± 0,09 bC
		Branco	735,15 ± 34,9 aB	6,63 ± 0,32 aA	3,42 ± 0,12 aA
		RBW	620,20 ± 29,1 bA	7,24 ± 0,33 aA	4,05 ± 0,14 aA
	Abaxial	Azul	738,51 ± 33,5 bB	8,40 ± 0,35 aB	3,71 ± 0,14 aB
		Vermelho	562,58 ± 27,4 bC	5,93 ± 0,24 bC	2,44 ± 0,09 bC
		Branco	651,26 ± 31,6 aB	7,34 ± 0,31 aA	4,26 ± 0,15 aA
		RBW	852,25 ± 39,1 aA	7,18 ± 0,33 aA	4,24 ± 0,16 aA
cv. Gran Rapids	Adaxial	Azul	671,78 ± 30,5 bB	6,37 ± 0,29 bB	2,73 ± 0,10 bB
		Vermelho	564,01 ± 26,8 bC	4,66 ± 0,22 cC	0,96 ± 0,04 cC
		Branco	746,91 ± 35,1 aB	7,85 ± 0,34 aA	1,87 ± 0,07 bA
		RBW	855,84 ± 39,8 aA	8,45 ± 0,36 aA	2,36 ± 0,09 aA
	Abaxial	Azul	610,59 ± 28,6 bB	6,37 ± 0,28 bB	2,00 ± 0,08 bB
		Vermelho	498,63 ± 24,3 bC	4,61 ± 0,21 cC	0,81 ± 0,04 cC
		Branco	660,41 ± 30,7 aB	7,85 ± 0,33 aA	1,74 ± 0,07 bA
		RBW	814,95 ± 37,9 aA	8,60 ± 0,36 aA	2,36 ± 0,09 aA

Letras minúsculas comparam linhagens dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo. Significância e teste utilizado.

3.3.6 Desempenho agrônômico da alface *versus* qualidade de luminosidade

Observou-se interação significativa entre genótipos de alface e espectros de luz para as características agronômicas avaliadas. A luz vermelha promoveu aumento no comprimento do caule nos genótipos UFU-155#1#1#1, UFU-Biofort e *Grand Rapids* (Figura 9A). Para comprimento de raiz, na luz azul, houve valores elevados na UFU-Biofort; nos espectros de luz azul e RBW no UFU-155#1#1#1; no espectro RBW, no UFU-189#1#2#1; e da luz vermelha na cultivar *Grand Rapids* (Figura 9B). Quanto ao diâmetro da planta, a luz vermelha apresentou valores superiores à luz azul em todos os genótipos, com exceção do UFU-189#1#2#1, no qual não houve diferença significativa entre esses espectros (Figura 9C). Em relação à massa fresca foliar e total, a luz azul resultou em valores inferiores aos demais espectros, promovendo menor acúmulo de biomassa nos genótipos UFU-Biofort e *Grand Rapids* (Figuras 9D e 2E).

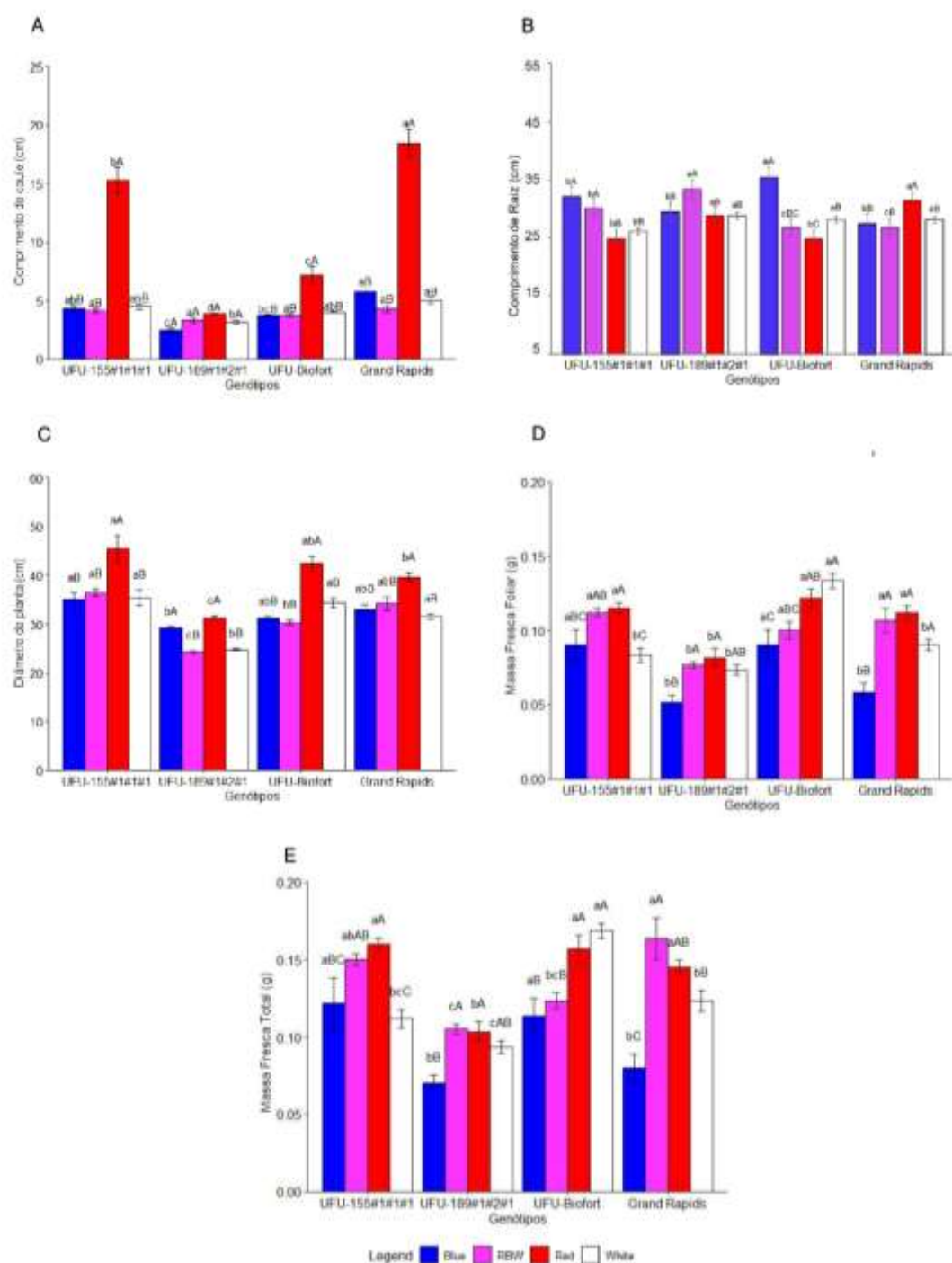


Figura 9. Características agrônômicas e produção de biomassa de linhagens de alface em sistema controlado com diferentes LEDs. (A) Comprimento do caule; (B) Comprimento da raiz; (C) Diâmetro da planta; (D) Massa fresca foliar; (E) Massa fresca total. Letras minúsculas comparam linhagens dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo ($p < 0,05$).

3.3.7 Perfil de nutrientes foliares em condições de luz variável

Constatou-se efeito significativo da interação entre genótipos de alface e espectros de luz sobre as concentrações foliares de Ca, K, Mg, Mn e Zn. O espectro RBW foi superior aos demais, promovendo os maiores teores desses nutrientes na maioria dos genótipos, com destaque para UFU-155#1#1#1 e UFU-189#1#2#1 (Tabela 2). A luz azul apresentou valores intermediários, sendo superior à luz vermelha para Ca, Mg, Mn e Zn. A luz branca superou a vermelha para K e Mn em alguns genótipos, porém apresentou desempenho inferior ao RBW. A luz vermelha resultou nos menores teores de nutrientes para a maioria dos genótipos avaliados, diferindo significativamente dos demais espectros. Entre os genótipos, UFU-189#1#2#1 apresentou maiores teores de Mn e Zn, enquanto UFU-155#1#1#1 se destacou para K e Ca sob o espectro RBW. A cultivar comercial *Grand Rapids* apresentou menor resposta à variação espectral, com diferenças menos expressivas entre os tratamentos.

Tabela 2. Concentração foliar de macronutrientes (Ca, K, Mg, P) e micronutrientes (Mn, Zn) em genótipos de alface submetidos a diferentes espectros de luz em ambiente controlado.

Genótipo	Trat.	Ca	K	Mg	P	Mn	Zn
		g Kg ⁻¹					mg Kg ⁻¹
UFU-155#1#1#1	Azul	9,90 cB	51,80 aC	5,90 cB	12,60 aA	183 bB	363,82 bB
	Vermelho	6,70 cD	48,10 aD	4,50 dD	7,80 bcC	153 dD	314,51 cC
	Branco	8,10 cC	53,20 aB	4,95 cC	10,75 aB	163 cC	366,60 bB
	RBW	12,60 bA	57,90 aA	6,75 bA	12,45 aA	258 bA	504,35 aA
UFU-189#1#2#1	Azul	13,10 aB	41,10 dB	7,30 aA	8,30 cB	272 aC	584,19 aB
	Vermelho	11,60 aC	40,50 cB	6,60 aB	7,70 cC	289 aB	601, aA
	Branco	11,20 aD	38,50 dC	6,35 aC	8,30 dB	211 bD	472,12 bC
	RBW	13,80 aA	41,90 dA	7,45 aA	8,65 bA	292 aA	605,37 aA
UFU-Biofort	Azul	11,10 bA	45,10 bB	6,20 bA	9,60 bA	173 cA	423,78 bA
	Vermelho	9,70 bD	43,50 bC	5,50 cC	8,50 aC	167 cB	377,47 cC
	Branco	10,40 bC	49,00 bA	5,90 bB	9,35 bB	150 dD	370,42 cC
	RBW	10,80 cB	42,60 cD	6,10 cA	8,45 bC	162 dC	381,12 cB
<i>Grand Rapids</i>	Azul	9,60 dB	44,30 cAB	5,45 dC	9,75 bA	140 dD	306,64 dC
	Vermelho	9,50 bB	40,80 cC	5,95 bB	8,00 bC	209 bC	397,15 cB
	Branco	10,40 bA	44,80 cA	6,05 bAB	8,60 cB	233 aB	455,20 bA
	RBW	10,60 cA	44,10 bB	6,20 cA	8,60 bB	237 cA	447,70 bA

Letras minúsculas comparam linhagens dentro do mesmo espectro e letras maiúsculas comparam espectros de luz dentro do mesmo genótipo (Tukey - $p < 0,05$).

3.3.8 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) demonstrou que a modulação espectral induz mecanismos adaptativos divergentes entre os genótipos, segregando respostas funcionais e estruturais (Figura 10). Sob luz azul (Figura 10A), a regulação fisiológica foi aportada por dimensões estomáticas e condutância (g_s , Ci) na cultivar comercial *Grand Rapids*, enquanto o genótipo UFU-Biofort maximizou o acúmulo de

biomassa e clorofilas. Para UFU-189#1#2#1, houve priorização da densidade estomática associada a fluxos energéticos. O espectro RBW (Figura 10B) evidenciou a estratégia de biofortificação da UFU-189#1#2#1, cujos vetores de espessura foliar se alinharam aos teores de Mn e Zn, contrastando com a *Grand Rapids*, que se manteve associada à condutância e à área foliar. Na luz vermelha (Figura 10C), a robustez produtiva da UFU-Biofort foi confirmada pela forte colinearidade entre densidade foliar e intensificação do transporte de elétrons (DIO/RC), ao passo que a UFU-155#1#1#1 manifestou respostas típicas de escape à sombra (alongamento do caule, *Ci*) e a UFU-189#1#2#1 associou-se à densidade nutricional (Mg e Mn). Por fim, sob luz branca (Figura 10D), a cultivar comercial *Grand Rapids* destacou-se por mecanismos de dissipação térmica (Φ_{Do}) e condutância teórica máxima (g_{wmax}).

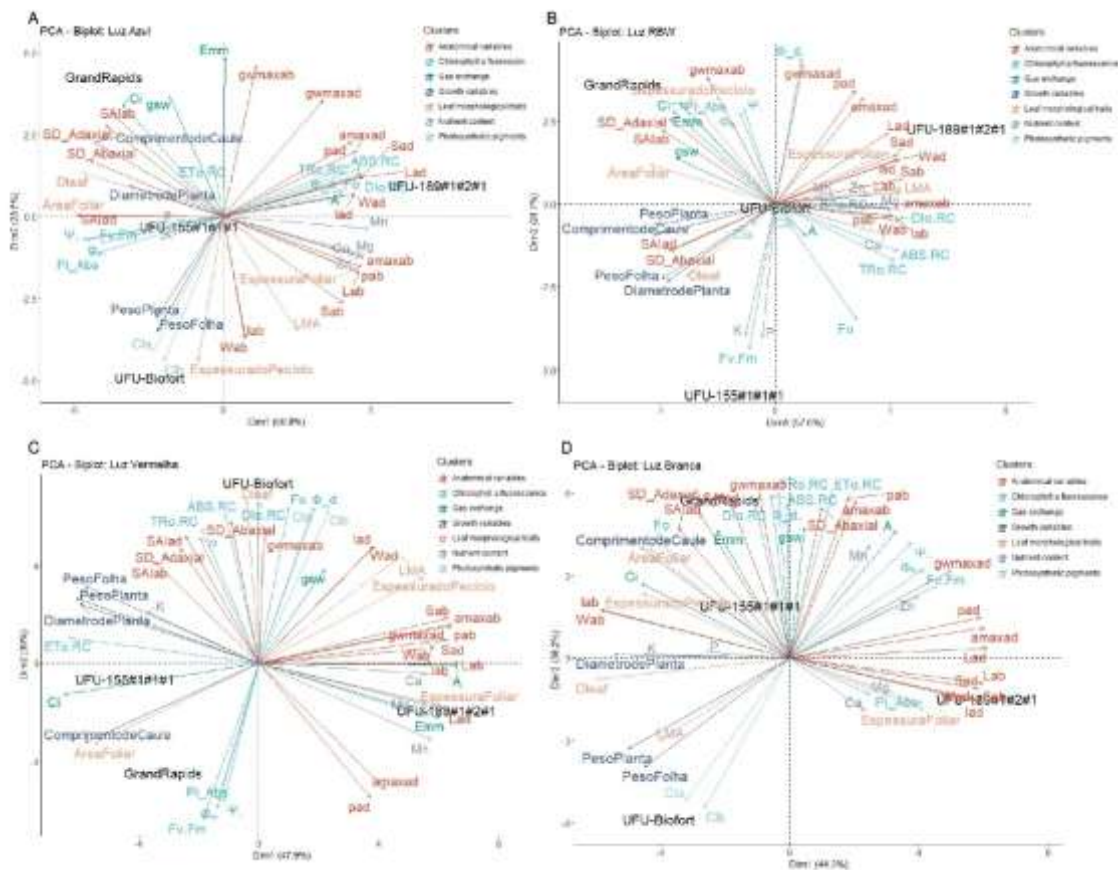


Figura 10. Análise de Componentes Principais (PCA) – Biplot ilustrando as correlações entre variáveis agrônômicas, fisiológicas, anatômicas e nutricionais de quatro genótipos de alface cultivados sob diferentes espectros de luz em sistema vertical aeropônico. (A) Azul; (B) RBW; (C) Vermelho; (D) Branco.

3.3.9 Redes Neurais

A análise SOM (Figura 11) segregou eficientemente os efeitos espectrais e genotípicos, integrando variáveis fisiológicas e nutricionais. A luz vermelha destacou-se por maximizar a biomassa e a absorção de nutrientes, especialmente Mn, Zn e B. O genótipo UFU-Biofort exibiu maior eficiência fotoquímica (F_v/F_m , P_i_Abs) e elevados teores de clorofila. O genótipo UFU-189#1#2#1 associou-se fortemente ao acúmulo de minerais e à maior espessura foliar, enquanto o UFU-155#1#1#1 se organizou em grupos de alta eficiência quântica com maior diâmetro de planta e Massa Fresca Total.

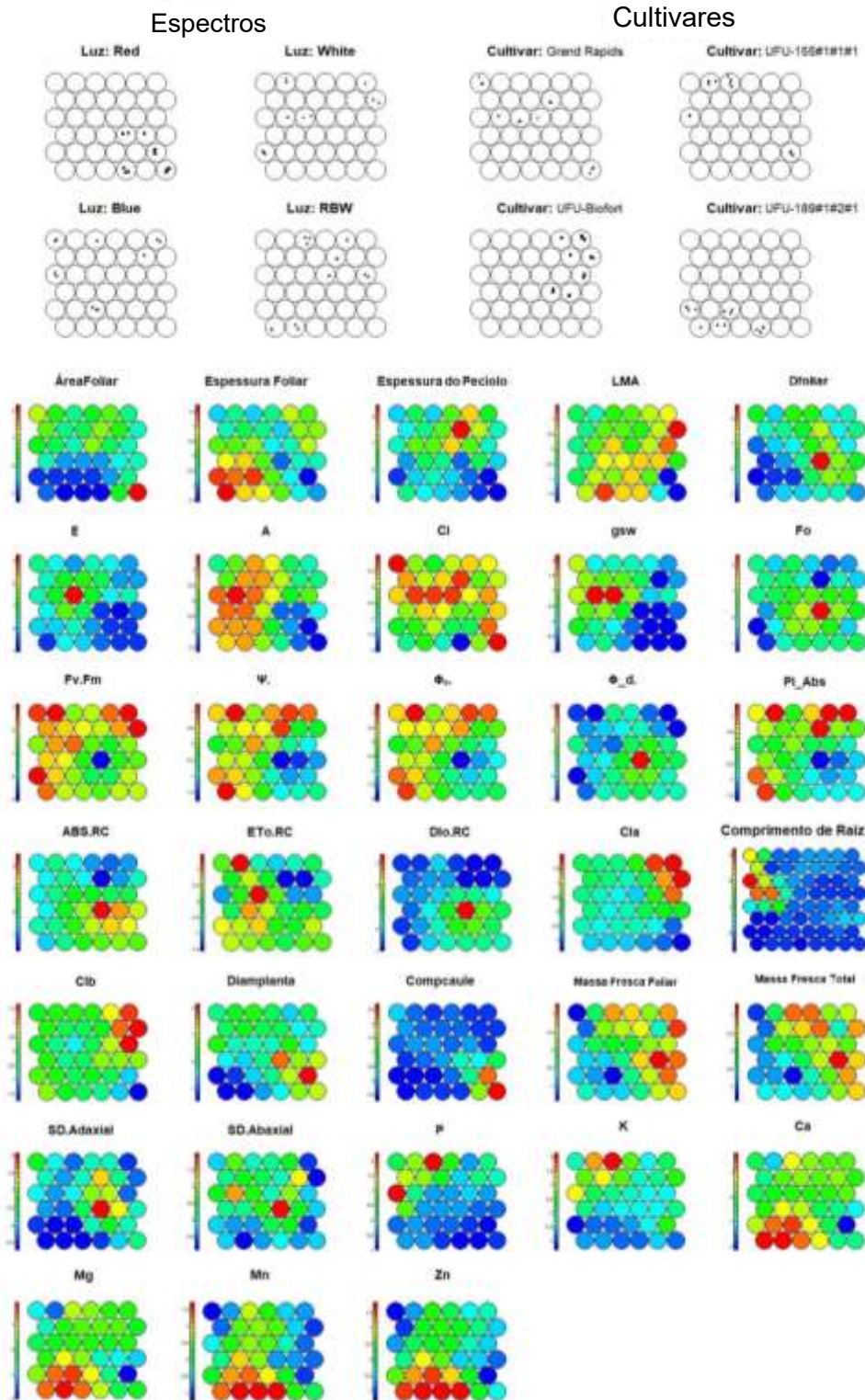


Figura 11. Mapa Auto-Organizável (Self-Organizing Map – SOM) treinado para o sistema vertical aeropônico de alface, considerando a interação entre genótipos e espectros de luz. Na parte superior, são apresentados os mapas de distribuição das unidades de entrada correspondentes aos espectros azul, vermelho, branco e RBW e aos genótipos avaliados. Na parte inferior, os mapas de componentes (*heatmaps*) representam a distribuição espacial das variáveis fisiológicas, anatômicas, nutricionais e produtivas na grade hexagonal 6x6, codificada por cores, em que tons de azul indicam menores valores e tons de vermelho indicam maiores valores das variáveis.

3.4 DISCUSSÃO

A intensificação das mudanças climáticas e a pressão sobre os recursos hídricos têm impulsionado o uso de sistemas de produção de alimentos em ambiente controlado, que oferecem maior escalabilidade produtiva, qualidade nutricional e previsibilidade ao longo do ano, independentemente das instabilidades meteorológicas externas (Benke; Tomkins, 2017; Orsini et al., 2020). Em ambiente vertical *indoor*, os genótipos avaliados no presente estudo apresentaram incremento dos acúmulos de nutrientes associado a um aparato fotossintético estrutural e funcionalmente mais robusto, capaz de sustentar elevados fluxos de energia e maior intensidade metabólica em resposta à modulação da qualidade espectral da luz. Nesse ambiente, a qualidade espectral da luz LED constitui um fator-chave, com efeitos amplamente documentados sobre o crescimento, a fotossíntese, o metabolismo secundário e a expressão gênica em hortaliças (Chen et al., 2016; Soufi et al., 2024). As respostas fisiológicas e bioquímicas observadas refletem características genéticas intrínsecas de determinados genótipos de alface, associadas a uma maior capacidade de adaptação, estabilidade fotoquímica e desempenho agrônômico superior sob estresse térmico e luminoso (Siquieroli et al., 2025). Dessa forma, como apresentado nesse estudo, a resposta das plantas à modulação espectral da luz não ocorre de forma isolada, sendo fortemente influenciada pela base genética dos genótipos, especialmente aqueles tropicalizados e biofortificados.

3.4.1 UFU-Biofort: pigmentos fotossintéticos como modulador da regulação fotoquímica e produtividade em ambiente *indoor*

A melhoria na produtividade vegetal resulta da integração entre absorção de energia, eficiência das reações fotoquímicas e a capacidade de fixação de CO₂ (Poorter et al., 2009; Kumar et al., 2023; Ermakova; Fitzpatrick; Larkum, 2024). Em sistemas de cultivo verticais *indoor*, nos quais a qualidade espectral da luz e a intensidade são fortemente moduladas, essa integração tende a impor desafios adicionais ao aparato fotossintético, especialmente quando a absorção de energia excede a capacidade de uso fotoquímico (Nájera et al., 2023; Demmig-Adams et al., 2022; Moraes et al., 2022). Os maiores teores de clorofilas *a* na UFU-Biofort sob LEDs azul, RBW e branco, em comparação aos demais genótipos (Figura 4), evidenciaram uma estratégia de

aclimatização ao ambiente luminoso, favorecendo o fluxo de elétrons para a fotossíntese (F_v/F_m , ETo/RC e Pi_Abs) (Figuras 5 e 11). Essa resposta pode estar relacionada à percepção otimizada pelos fotorreceptores sob comprimentos de onda de amplo espectro, promovendo a ativação sinérgica de criptocromos, essenciais na abertura estomática e inibição do estiolamento, e de fitocromos, reguladores da expansão foliar e fotomorfogênese (McCree, 1971; Smith et al., 2017; Qiao et al., 2025).

Contudo, a produtividade relacionada à massa fresca foliar e total na UFU-Biofort foi a mesma entre a luz branca e vermelha (Figura 9 D-E; Figura 10; Figura 11), sugerindo que o espectro vermelho otimiza a utilização da energia absorvida para a produção de biomassa e estruturação do mesófilo, conforme evidenciado pela associação com a densidade foliar (Figura 8C; Figura 10), ainda que operando sob taxas fotossintéticas (A) moderadas (Figura 7D). O desempenho agrônomo superior da UFU-Biofort sustentou-se em uma estratégia integrada de regulação energética e capacidade de adaptação morfofisiológica (Figura 10). A planta apresentou maior conteúdo de pigmentos fotossintéticos (Clorofila a e total; Figura 4) e aumento da energia absorvida por centro de reação (ABS/RC ; Figura 6A). Esse maior aporte energético foi acompanhado por incremento nos mecanismos de dissipação térmica (DIo/RC e ΦDo ; Figura 6B-C), indicando ajuste fotoprotetor do aparato fotossintético (McCree, 1971; Pennisi et al., 2019; Chen et al., 2016). Essa estabilidade fisiológica permitiu o investimento em ajustes estruturais específicos, como no aumento da densidade foliar (D_{foliar}), que otimizou o espalhamento de luz (*light scattering*) para maior interceptação de fótons (Li et al. 2021; Lei et al. 2022; Qiao et al. 2025) para a fotossíntese. Associada a isso, a elevação da densidade estomática abaxial ($SD_{abaxial}$) amplia a condutância máxima teórica (g_{wmaxab}) e regula a absorção de CO_2 (Soufi et al., 2024; Li et al., 2021). Portanto, essa coordenação entre a dissipação eficiente do excesso de energia e a plasticidade anatômica permite que a UFU-Biofort mantenha o vigor produtivo sem comprometer a biossíntese de metabólitos, consolidando sua eficiência como um genótipo de alto desempenho em sistemas de agricultura vertical (Siquieroli et al., 2025; Moraes et al., 2022).

No entanto, sob o espectro vermelho, os maiores valores de diâmetro de planta, massa fresca foliar e total (Figuras 6 C, D e E; Figura 8) demonstram a capacidade de ajuste entre absorção (Figura 4), transporte e dissipação de energia (Figura 5) em função do crescimento. Essa resposta expansiva decorre da supressão da sinalização mediada pelos criptocromos (fotorreceptores de luz azul), induzindo o vegetal a interpretar o

ambiente luminoso como sombreado (Spalholz et al., 2020; Yun et al., 2023; Kurepa; Smalle, 2022). Tal percepção ativa a síndrome de luz vermelha, processo regido pela conversão do fitocromo para sua forma inativa, o que altera o balanço hormonal ao favorecer a síntese de auxinas (AIA) em detrimento das citocininas (Kurepa; Smalle 2022; Yun et al. 2023). Consequentemente, prioriza-se a elongação celular longitudinal em substituição aos processos de divisão e diferenciação tecidual (Demotes-Mainard et al., 2016; Kalaitzoglou et al., 2019). A luz vermelha promove um intenso investimento na expansão da área foliar como estratégia para aumentar a superfície de captação de luz (Hong et al., 2023; Pennisi et al., 2019), alinhando-se ao padrão verificado neste trabalho na cultivar *Grand Rapids*, não tropicalizada (Figura 8A). Embora as espécies vegetais comumente exibam uma relação de compromisso (*trade-off*) entre a alocação de recursos para o crescimento e o investimento no aparato fotossintético, o espectro vermelho destaca-se por sua elevada eficiência quântica na excitação direta das moléculas de clorofila (McCree, 1971; Pennisi et al., 2019), comportamento evidenciado nas respostas fisiológicas das linhagens UFU-155#1#1#1 e UFU-Biofort (Figura 6A).

A ausência de luz azul compromete a abertura estomática (Singh; Giri; Chattopadhyay, 2025; Singh; Giri; Chattopadhyay, 2025), fato evidenciado no presente estudo pelos menores valores de condutância estomática (g_s) (Figura 7A). Esse fechamento estomático desencadeia um gargalo fisiológico em que a elevada disponibilidade de energia luminosa contrasta com o aporte limitado de CO₂ necessário para a fase bioquímica. Os elevados valores de fluxo de absorção (ABS/RC, Figura 9A) e transporte de elétrons (ETo/RC, Φ_{Eo}) indicam a manutenção de intensa atividade na sua cadeia transportadora (Ermakova; Fitzpatrick; Larkum, 2024; Demmig-Adams et al., 2022). Nesse sentido, sem CO₂ suficiente para consumir o ATP e NADPH gerados, a superexcitação do Fotossistema II, evidenciada pela redução da eficiência quântica máxima (F_v/F_m) e do índice de desempenho (P_i_Abs) (Figura 5A-B), promoveu aumento no rendimento quântico da dissipação (Φ_{Do}) (Figura 6; Figura 11). Para mitigar o estresse foto-oxidativo, as plantas ativam a extinção não fotoquímica (NPQ) via ciclo das xantofilas (Singh et al., 2024; Singh et al., 2024). Esse mecanismo, desencadeado pela acidificação do lúmen tilacoidal, promove a conversão de violaxantina em zeaxantina, permitindo a dissipação do excesso energético como calor, protegendo o Fotossistema II (Demmig-Adams et al., 2022; Moraes et al., 2022).

A UFU-Biofort sustentou seu crescimento sob luz vermelha não pela eficiência fotossintética, mas pelo ajuste na utilização de luz, como evidenciado pela ativação de

mecanismos de dissipação térmica (ABS/RC , Φ_{Do} ; Figura 10C) que protegem o aparato fotoquímico contra a pressão de excitação decorrente de limitações estomáticas (Soufi et al. 2024; Singh et al., 2024). Essa priorização da estabilidade metabólica permitiu a expansão estrutural, diferindo da estratégia da cultivar *Grand Rapids* não tropicalizada, que dependeu essencialmente da manutenção de altas taxas de trocas gasosas (E , g_s ; Figura 7A-B). A maior produtividade da UFU-Biofort associou-se, portanto, à eficiente modulação de clorofila frente à qualidade espectral da luz. Tal resposta adaptativa indica um maior requerimento nutricional, necessário para viabilizar a síntese de pigmentos e o investimento em estruturação foliar, consolidando a base fisiológica de sua superioridade em comparação com os demais genótipos (Singh et al., 2024; Kumar et al., 2024).

3.4.2 Correlação entre o incremento nutricional e a morfologia foliar na UFU-189#1#2#1

O potencial de biofortificação agronômica da linhagem UFU-189#1#2#1 foi otimizado sob o espectro RBW, evidenciando um padrão de partição de biomassa divergente daquele observado na *Grand Rapids*. Enquanto essa cultivar comercial investiu na expansão aérea, a linhagem tropicalizada priorizou o desenvolvimento do sistema radicular (Figura 9B), otimizando a absorção de nutrientes (Orsini et al., 2020; Lei et al., 2022; Kurepa; Smalle, 2022). A Análise de Componentes Principais sob o espectro RBW (Figura 10B) confirma essa integração funcional na linhagem UFU-189#1#2#1, demonstrando forte correlação vetorial entre o comprimento radicular (CR), a massa foliar específica (LMA) e o acúmulo foliar de Mg e Zn. Essa resposta, corroborada pelo Mapa Auto-Organizável (Figura 11), evidencia que o ajuste nas dimensões estomáticas maximiza o fluxo transpiratório, sendo essencial para a translocação de minerais via xilema até o mesófilo (Kumar et al., 2023; Moraes et al., 2022; Siquieroli et al., 2025).

Do ponto de vista nutricional, tais nutrientes exercem funções estruturais e catalíticas, sendo o Mg constituinte central do anel porfirínico da molécula de clorofila, enquanto o Zn atua como cofator enzimático e precursor da síntese de auxinas (Moraes et al., 2022). No âmbito da saúde coletiva, a biofortificação agronômica da UFU-189#1#2#1 configura uma estratégia profilática determinante para mitigar a "fome oculta", prevenindo desordens imunológicas e metabólicas na população (FAO et al., 2023; Sanches et al., 2025; Kumar et al., 2024). A PCA evidencia que, na linhagem UFU-

189#1#2#1, a maximização das variáveis morfométricas estomáticas em ambas as faces foliares sob luz RBW não é um evento isolado, mas um ajuste que reduz a resistência à difusão do CO₂ para o mesófilo (Siquieroli et al., 2025). Esse aumento nas dimensões estomáticas, aliado à superior Eficiência do Uso da Água (*A/gs*), indica um controle estomático altamente responsivo, podendo-se presumir que a planta amplia sua capacidade de influxo de CO₂ para sustentar a taxa fotossintética (*A*) sem incorrer em perdas hídricas desproporcionais por transpiração (*E*) (Pennisi et al., 2019; Kumar et al., 2023; Soufi et al., 2024).

Dessa forma, a estabilidade fenotípica das linhagens UFU-189#1#2#1 e UFU-Biofort sugere uma base genética adaptada que preserva o equilíbrio fotoestacionário do fitocromo. Essa resiliência ocorre pelo fato de os genótipos tropicalizados possuírem mecanismos de sinalização que estabilizam a forma ativa do fotorreceptor, impedindo a percepção errônea de sombreamento sob luz artificial (Kelly; Runkle, 2024; Siquieroli et al., 2025). Tal ajuste é fundamental para mitigar a dominância apical induzida por auxinas, o que previne o pendoamento precoce (Yun et al., 2023; Kalaitzoglou et al., 2019; Spalholz; Perkins-Veazie; Hernández, 2020). A manutenção desse equilíbrio, evidenciada pelo controle do crescimento vertical do caule (Figura 9A), favorece uma relação auxina/citocinina que prioriza a expansão radicular (Figura 9B) (Kurepa; Smalle, 2022; Yun et al., 2023). Consequentemente, observa-se o espessamento do limbo foliar, traduzido por maiores valores de LMA e de espessura foliar (Figuras 8E e 8B). Esse padrão confirma que a qualidade espectral modula a partição de fotoassimilados, direcionando o fluxo de carbono para as partes vegetativas (Lei et al., 2022; Poorter et al., 2009; Soufi et al., 2024). Portanto, a tropicalização destes genótipos resulta em resiliência morfogenética frente aos sinais de competição luminosa. Sob luz RBW, as plantas redirecionam a energia para a consolidação de drenos metabólicos ativos, como raízes e mesófilo, o aumento no teor de nutriente (Nunes; Kiyota; Andrade, 2022; Moraes et al., 2022; Kumar et al., 2023). Esse redirecionamento ocorre em detrimento da alongação celular excessiva, típica do estiolamento (Arachchige et al., 2024; Sanches et al., 2025; Siquieroli et al., 2025). Assim, a arquitetura compacta observada (Figura 10B; Figura 11) nos genótipos valida a melhor adaptação nesses ambientes, convertendo o aporte luminoso em qualidade funcional e nutricional.

3.4.3 A fotoquímica da qualidade de luz como *driver* de biofortificação nutricional: interação com genótipos de alta capacidade de adaptação fisiológica

A incidência de luz vermelha impôs uma limitação fisiológica ao aparato fotossintético dos genótipos tropicalizados, diferentemente do padrão observado sob espectro RBW. Esse fenômeno se assemelha ao reportado por Li et al. (2021), que atribuem o declínio fotossintético sob luz vermelha à inibição do desenvolvimento do aparato bioquímico do vegetal. Além disso, a redução da eficiência quântica verificada neste estudo corrobora os achados de Nájera et al. (2023) e Soufi et al. (2024), que destacam que a ausência de luz azul compromete a homeostase do transporte de elétrons, culminando na degradação funcional dos centros de reação. Enquanto neste estudo, a análise dos índices de viabilidade do Fotossistema II (F_v/F_m e P_i_Abs) revelaram que, sob luz vermelha, os genótipos UFU-Biofort e UFU-155#1#1#1 sofreram reduções significativas na eficiência quântica máxima (F_v/F_m ; Figura 5A) e no Índice de Desempenho Fotossintético (P_i_Abs ; Figura 5B).

A redução acentuada nos valores de F_v/F_m e P_i_Abs observada nos genótipos UFU-Biofort e UFU-155#1#1#1 indica que o uso da luz vermelha comprometeu a integridade funcional do Fotossistema II (PSII). Esse declínio é um indicativo clássico da "síndrome da luz vermelha", em que a ausência de fótons na faixa do azul (400-500 nm) impede a regulação adequada dos centros de reação e a biogênese de proteínas estruturais. Biologicamente, a falta do espectro azul reduz a abertura estomática e o desenvolvimento do mesófilo, criando um descompasso entre a alta taxa de absorção de fótons vermelhos e a limitada capacidade de processamento metabólico (Li et al., 2021; Nájera et al., 2023).

Na UFU-Biofort, os elevados valores de fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ET_o/RC) e rendimento quântico do transporte de elétrons (Φ_{Eo} ; Figura 5D) não foram eficientemente convertidos em energia química, demonstrando um desacoplamento estequiométrico na cadeia transportadora de elétrons (Ermakova; Fitzpatrick; Larkum, 2024). Essa disfunção é corroborada pela Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 10C), que segregou os vetores de fluorescência. Sob luz vermelha, os genótipos tropicalizados deslocaram-se na direção oposta aos vetores de eficiência (P_i_Abs , Φ_{Eo}), alinhando-se fortemente a variáveis de dissipação térmica (DIO/RC e Φ_{Do}) e estresse (Moraes et al., 2022). Concomitantemente, o Mapa Auto-Organizável (SOM) (Figura 11) revelou que esta mesma condição de estresse (luz Vermelha/Tropicalizados) formou um cluster de alta intensidade para a acumulação de

Mn e Zn. Isso fundamenta a premissa de que o aporte nutricional nestes genótipos atua como um ajuste metabólico compensatório, destinado à mitigação de danos foto-oxidativos e à manutenção da resiliência fisiológica sob condições de saturação energética (Siquieroli et al., 2025; Demmig-Adams et al., 2022). A grande absorção de Mn (Tabela 2; Figura 11) auxilia no reparo contínuo do Complexo de Evolução de Oxigênio (OEC) (Oliver et al., 2022), sítio primário de danos na fotoinibição (Meng et al., 2025), enquanto o Zn (Figura 11) é mobilizado estequiometricamente para a síntese de superóxido dismutase (Cu/Zn-SOD) (Gharedaghloo; Najafpour, 2025), atuando na neutralização das Espécies Reativas de Oxigênio (EROs), geradas em decorrência do colapso funcional da cadeia transportadora de elétrons (Soufi et al., 2024). Esses resultados apontam a biofortificação nutricional nos genótipos tropicalizados como uma estratégia de fotoproteção voltada à manutenção da homeostase redox frente à saturação energética (Siquieroli et al., 2025; Moraes et al., 2022).

O desacoplamento entre o alto fluxo de elétrons (ETo/RC) e a baixa eficiência de transporte (Φ_{EO} ; Figuras 5C e 5D), associada à queda na eficiência máxima (F_v/F_m ; Figura 5A), sugere que a biofortificação observada não decorreu de vigor vegetativo, mas de uma resposta de mitigação ao estresse oxidativo (Azmat et al., 2022; Demmig-Adams et al., 2022; Soufi et al., 2024). Portanto, o incremento nutricional atua como um ajuste metabólico compensatório, garantindo a integridade celular e a resiliência do aparato fotossintético em sistemas de agricultura vertical de alta irradiância (Demmig-Adams et al., 2022; Soufi et al., 2024). Sob pressão de espectros limitantes, a planta redireciona a partição de fotoassimilados para o metabolismo secundário e o acúmulo seletivo de minerais, priorizando a estabilidade das membranas tilacoidais em detrimento da expansão foliar (Azmat et al., 2022; Nájera et al., 2023).

3.5 CONCLUSÕES

Houve interação significativa entre genótipos e espectros de luz para todas as variáveis fisiológicas, nutricionais e produtivas. O espectro vermelho atuou como principal modulador do crescimento em extensão, porém induziu estresse foto-oxidativo e comprometeu as trocas gasosas (A e g_s) em todos os genótipos. Em contraste, os espectros Azul e RBW otimizaram o aparato estomático e a estabilidade fotoquímica, sendo o RBW a estratégia mais eficaz para a biofortificação nutricional de Ca, K, Mg, Mn e Zn.

As linhagens tropicalizadas UFU-Biofort e UFU-189#1#2#1 apresentaram desempenho fisiológico e nutricional superior à cultivar comercial *Grand Rapids*, demonstrando maior aptidão ao ambiente controlado e robustez estrutural. Conclui-se que o uso de espectros Azul e RBW é determinante para a qualidade funcional da alface produzida com iluminação artificial. Para futuras pesquisas, recomenda-se a investigação de espectros brancos com suplementação específica de azul visando à redução do porte das plantas e à otimização da arquitetura foliar.

3.6 REFERÊNCIAS

ARACHCHIGE, S. M. et al. Confronting heat stress in crops amid global warming: impacts, defense mechanisms, and strategies for enhancing thermotolerance. **Crop Breeding, Genetics and Genomics**, v. 6, n. 4, 2024.

AZMAT, R. et al. The investigation of the impact of toxicity of metals on oxygen-evolving complex in *Spinacia oleracea*. **Antioxidants**, v. 11, n. 9, p. 1802, 2022.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003.

BENKE, K.; TOMKINS, B. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. **Sustainability: Science, Practice and Policy**, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2017.

CHEN, X. et al. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. **Scientia Horticulturae**, v. 200, p. 111-118, 2016.

CLEMENTE, A. A. et al. High-throughput phenotyping to detect anthocyanins, chlorophylls, and carotenoids in red lettuce germplasm. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 103, p. 102533, 2021.

CLEMENTE, A. A. et al. Nutritional characterization based on vegetation indices to detect anthocyanins, carotenoids, and chlorophylls in mini-lettuce. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1403, 2023.

DEMMIG-ADAMS, B. et al. History of excess-light exposure modulates extent and kinetics of fast-acting non-photochemical energy dissipation. **Plant Physiology Reports**, v. 27, n. 4, p. 560-572, 2022.

DEMOTES-MAINARD, S. et al. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 121, p. 4-21, 2016.

EMBRAPA. **Calor pode inviabilizar cultivo de alface em campo aberto no Brasil até o fim do século**. Brasília, DF: Embrapa, 18 out. 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/102729113/calor-pode-inviabilizar-cultivo-de-alface-em-campo-aberto-no-brasil-ate-o-fim-do-seculo>. Acesso em: 15 dez. 2025.

ERMAKOVA, M.; FITZPATRICK, D.; LARKUM, A. W. D. Cyclic electron flow and Photosystem II-less photosynthesis. **Functional Plant Biology**, v. 51, n. 11, 2024.

FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023**: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome: FAO, 2023.

GHAREDAGHLOO, M.; NAJAFPOUR, M. M. Oxygen-evolution reaction on the surface of layered manganese oxide under neutral conditions: a bioinspired strategy achieving ultra-low overpotential. **ACS Applied Energy Materials**, v. 8, n. 6, p. 3916-3928, 2025.

GUEDES, I. M. R. et al. Cultivo protegido de hortaliças em solo e em substrato. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 45, n. 326, p. 30-37, 2024.

HONG, Y. et al. Effects of light quality on microalgae cultivation: bibliometric analysis, mini-review, and regulation approaches. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-18, 2023.

IPCC. **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 184 p.

KALAITZOGLU, P. et al. Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 322, 2019.

KAYOUMU, M. et al. Phosphorus availability affects the photosynthesis and antioxidant system of contrasting low-P-tolerant cotton genotypes. **Antioxidants**, v. 12, n. 2, p. 466, 2023.

KELLY, N.; RUNKLE, E. S. Dependence of far-red light on red and green light at increasing growth of lettuce. **PloS One**, v. 19, n. 11, p. e0313084, 2024.

KUMAR, A. et al. Genetic manipulation of photosynthesis to enhance crop productivity under changing environmental conditions. **Photosynthesis Research**, v. 155, n. 1, p. 1-21, 2023.

KUMAR, J. et al. Biofortification of *Triticum* species: a stepping stone to combat malnutrition. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p. 668, 2024.

KUREPA, J.; SMALLE, J. A. Auxin/cytokinin antagonistic control of the shoot/root growth ratio and its relevance for adaptation to drought and nutrient deficiency stresses. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 4, p. 1933, 2022.

LEI, Z. et al. Leaf trait covariation and controls on leaf mass per area (LMA) following cotton domestication. **Annals of Botany**, v. 130, n. 2, p. 231-243, 2022.

LI, L. et al. Morphology, photosynthetic traits, and nutritional quality of lettuce plants as affected by green light substituting proportion of blue and red light. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 627311, 2021.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.

LICHTENTHALER, H. K.; WELLBURN, A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions**, v. 11, n. 5, p. 591-592, 1983.

MACIEL, G. M. et al. Image phenotyping of inbred red lettuce lines with genetic diversity regarding carotenoid levels. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 81, p. 154-160, 2019.

MACIEL, G. M. et al. Image phenotyping of lettuce germplasm with genetically diverse carotenoid levels. **Bragantia**, v. 79, n. 2, p. 1-12, 2020.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MCCREE, K. J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. **Agricultural Meteorology**, v. 9, p. 191-216, 1971.

MENG, L. et al. Mycorrhiza-mediated manganese dynamics drive photosynthetic adaptation to water deficit in trifoliolate orange. **Tree Physiology**, p. tpaf167, 2025.

MORAES, C. C. et al. Agronomic biofortification of lettuce with zinc under tropical conditions: Zinc content, biomass production and oxidative stress. **Scientia Horticulturae**, v. 303, p. 111218, 2022.

NÁJERA, C. et al. Role of spectrum-light on productivity, and plant quality over vertical farming systems: bibliometric analysis. **Horticulturae**, v. 9, n. 1, p. 63, 2023.

NUNES, E. A.; KIYOTA, E.; ANDRADE, S. A. L. Cadmium accumulation in a tropicalized lettuce variety under overfertilization simulation. **CLEAN–Soil, Air, Water**, v. 50, n. 3, p. 2100065, 2022.

OLIVER, N. et al. From manganese oxidation to water oxidation: assembly and evolution of the water-splitting complex in photosystem II. **Photosynthesis Research**, v. 152, n. 2, p. 107-133, 2022.

ORSINI, F. et al. Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). **European Journal of Horticultural Science**, v. 85, n. 5, p. 297-309, 2020.

PENNISI, G. et al. Resource use efficiency of *indoor* lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red: blue ratio provided by LED lighting. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 14127, 2019.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. et al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167-234, 2013.

POORTER, H. et al. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta analysis. **New Phytologist**, v. 182, n. 3, p. 565-588, 2009.

PURQUERIO, L. F. V. et al. **Potencial do cultivo vertical indoor com iluminação artificial no contexto das mudanças climáticas**. INFORME AGROPECUÁRIO (BELO HORIZONTE), v. 45, p. 17-29, 2024

QIAO, J. et al. Effect of LED Lights on Morphological Construction and Leaf Photosynthesis of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Horticulturae**, v. 11, n. 1, p. 43, 2025.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.

RIBEIRO, A. L. A. et al. Vegetation indices for predicting the growth and harvest rate of lettuce. **Agriculture**, v. 13, n. 5, p. 1091, 2023.

ROBSON, J. K. et al. Chlorophyll fluorescence-based high-throughput phenotyping facilitates the genetic dissection of photosynthetic heat tolerance in African (*Oryza glaberrima*) and Asian (*Oryza sativa*) rice. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, n. 17, p. 5181-5197, 2023.

SANCHES, A. A. et al. Selection of lettuce hybrids to generate productive carotenoid-biofortified populations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 4, p. e278163, 2025.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.

SINGH, M. et al. Plant functional traits assisted crop adaptation to abiotic and biotic stress. *In*: **Plant functional traits for improving productivity**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 239-255.

SINGH, N.; GIRI, M. K.; CHATTOPADHYAY, D. Lighting the path: how light signaling regulates stomatal movement and plant immunity. **Journal of Experimental Botany**, v. 76, n. 3, p. 769-786, 2025.

SIQUIEROLI, A. C. S. et al. Tropicalized lettuce: photosynthetic efficiency, water use, and agronomic–nutritional potential. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 1380, 2025.

SMITH, H. L.; MCAUSLAND, L.; MURCHIE, E. H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 9, p. 2099-2110, 2017.

SOUFI, H. et al. The roles of light in a plant factory: photosynthesis efficiency and gas exchange parameters of lettuce as a function of light spectra. **Greenhouse Plant Production Journal**, v. 1, n. 1, p. 1-26, 2024.

SOUZA, C. S. et al. Genetic divergence between lettuce genotypes using AFLP markers. **Bragantia**, v. 66, n. 1, p. 11-16, 2007.

SPALHOLZ, H.; PERKINS-VEAZIE, P.; HERNÁNDEZ, R. Impact of sun-simulated white light and varied blue: red spectrums on the growth, morphology, development, and phytochemical content of green-and red-leaf lettuce at different growth stages. **Scientia Horticulturae**, v. 264, p. 109195, 2020.

STRASSER, R. J. et al. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. **Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaptation**, v. 25, p. 445-483, 2000.

VON CAEMMERER, S.; FARQUHAR, G. D. Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. **Planta**, v. 153, n. 4, p. 376–387, 1981.

WITKOWSKI, E. T. F.; LAMONT, B. B. Leaf specific mass, stomatal characteristics and TE of sclerophyllous leaves co-occurring at seven coastal sites in South-western Australia. **Oecologia**, v. 88, p. 486-493, 1991.

YUN, F. et al. The role of light-regulated auxin signaling in root development. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 6, p. 5253, 2023.

