



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS GENÉTICOS VEGETAIS

Luciano Tartaro

Desenvolvimento da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), submetida a diferentes espectros luminosos

Orientadora: Dra. Rosete Pescador

Florianópolis - SC
2023

Luciano Tartaro

Desenvolvimento da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), submetida a diferentes espectros luminosos

Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Rosete Pescador

Florianópolis - SC

2023

Tartaro, Luciano

Desenvolvimento da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), submetida a diferentes espectros luminosos / Luciano Tartaro ; orientadora, Rosete Pescador, 2023.

75 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Recursos Genéticos Vegetais. 2. pigmentos fotossintéticos. 3. SPAD. 4. fluorescência da clorofila. 5. cultivo indoor. I. Pescador, Rosete. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais. III. Título.

Luciano Tartaro

Desenvolvimento da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), submetida a diferentes espectros luminosos

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 29 de Junho de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Rosete Pescador, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) André Ricardo Zeist, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Italo Moraes Rocha Guedes, Dr.(a)
Embrapa Hortaliças

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Insira neste espaço a
Assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
Assinatura digital

Prof.(a) Rosete Pescador, Dr.(a)
Orientador(a)

Florianópolis, 2023.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ser meu guia e me permitir viver e contribuir para a sociedade.

A minha família, em especial aos meus pais, Oscar Tartaro e Suelci Maria Tartaro, por todo o esforço inegável, que desde criança me criaram com uma enorme educação, sempre ajudando e dando lições de vida, e me dando amor. “Respira e vai em frente, como diz minha mãe”.

Ao meu namorado, Jean Benvenuto, com quem eu convivo diariamente e que me acompanhou durante toda essa jornada. Agradeço por nunca ter deixado eu desistir, por sempre acolher meu choro e me encorajar a seguir em frente, nunca duvidando de minha capacidade.

A mim mesmo por ter chegado a esta etapa, que teve diversas pedras no caminho, mas mesmo calejando, não deixei de concluir.

A minha orientadora, Rosete Pescador, que me acolheu desde que eu decidi entrar no mestrado, dando orientações, ensinando, respeitando minhas decisões e permitindo lecionar a disciplina de estágio à docência, repassando os ensinamentos adquiridos.

Ao professor Jorge Barcelos, que me acolheu desde a chegada em Florianópolis, permitindo-me estagiar em seu laboratório e despertar o interesse por cultivo com LED's. Agradeço grandemente por propiciar condições para que eu executasse os experimentos de mestrado com êxito.

Ao Elinton Soares Pontes, Juliana Destri Perozin e Tainara Gris, que me ajudaram de forma irrefutável durante toda a condução dos experimentos, além demais colegas do NPBV, LFGDV e LabHidro, que marcaram suas contribuições, seja em avaliação do experimento ou em ajudar a segurar o choro, nos momentos de frustrações.

Aos professores Tiago Olivoto e Simone D. S. de Medeiros, que contribuíram grandemente nas análises estatísticas, dando direções e criando possibilidades de discussão dos resultados.

A UFSC e o Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, que me cedeu espaço para desenvolver essa linda pesquisa e contribuir com os avanços para a produção de alimentos no mundo, gratificando-me ao final com um título de mestre em ciências.

À CAPES, por me ceder bolsa durante todo o período de pós graduação.

Por fim, a grande oportunidade de conhecer pessoas maravilhosas que levarei para toda a vida e por poder aprimorar meus conhecimentos perante a produção de plantas.

RESUMO

A iluminação artificial tem ganhado espaço notório nos últimos anos devido à sua capacidade de suprir os comprimentos de onda necessários à vida das plantas, além de permitir um maior controle no processo produtivo. A expansão do mercado de lâmpadas de LED propiciou um enorme avanço nesse tipo de cultivo, superando as limitações anteriores, como elevado custo energético, baixa versatilidade de comprimentos de onda e alta emissão de calor. A alface (*Lactuca sativa* L.) é muito valorizada nesse tipo de ambiente devido ao seu rápido crescimento e desenvolvimento, além da capacidade de se adaptar às diversas condições, o que tem levado a um foco de pesquisa no aumento da produção de biomassa e na compreensão das condições ambientais mais propícias. O objetivo deste estudo foi investigar o comportamento das plantas quando expostas a diferentes comprimentos de onda de lâmpadas do tipo LED, avaliando variáveis morfológicas, bioquímicas e fisiológicas relevantes. Plantas de alface provenientes de uma estufa de produção de mudas foram expostas a LEDs monocromáticos azuis, brancos, azuis + vermelhos, vermelhos e a uma condição de iluminação natural de estufa de cultivo protegido, por 13 dias. Foram avaliados aspectos morfológicos, como massa fresca e seca, altura da parte aérea, comprimento da raiz e consumo de solução nutritiva e água; bioquímicos, como síntese de açúcares, clorofilas *a*, *b* e totais, e carotenoides; e fisiológicos, como eficiência quântica do fotossistema II e índice SPAD. A partir dos resultados verificou-se que comprimentos de onda afetaram a morfologia e fisiologia avaliadas, porém, não todas as variáveis bioquímicas. Em relação a morfologia, plantas do tratamento azul + vermelho se destacaram quanto à massa fresca e seca da raiz, altura da parte aérea e comprimento da raiz, porém, as plantas consumiram mais solução nutritiva e água. Em relação à bioquímica, plantas dos tratamentos azul e combinação azul + vermelho se destacaram, proporcionando maior quantidade de clorofilas *a* e totais, assim como carotenoides, enquanto presença de luz branca acarretou em plantas com redução de açúcares. Fisiologicamente, as plantas expostas ao tratamento de luz azul monocromática e combinação azul + vermelha apresentaram melhores resultados em relação à eficiência quântica do fotossistema II, enquanto que para o índice SPAD, as plantas destes dois tratamentos apresentaram resultados similares às expostas à condição de estufa. Com os experimentos ficou evidente a influência dos comprimentos de onda nas respostas morfológicas, fisiológicas e bioquímicas das plantas, principalmente dos comprimentos de onda azul + vermelho, surtindo êxito com os objetivos de pesquisa e fomentando novos experimentos das áreas em questão.

Palavras-chave: pigmentos fotossintéticos, SPAD, fluorescência da clorofila, cultivo *indoor*.

ABSTRACT

Artificial lighting has gained notorious space in recent years due to its ability to supply the wavelengths necessary for plant life, in addition to allowing greater control in the production process. The expansion of the LED lamp market has provided a huge advance in this type of cultivation, overcoming previous limitations, such as high energy cost, low versatility of wavelengths and high heat emission. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is highly valued in this type of environment due to its rapid growth and development, as well as the ability to adapt to various conditions, which has led to a research focus on increasing biomass production and understanding the most conducive environmental conditions. The aim of this study was to investigate the behavior of plants when exposed to different wavelengths of LED lamps, evaluating relevant morphological, biochemical and physiological variables. Lettuce plants from a seedling production greenhouse were exposed to blue, white, blue + red, red monochrome LEDs and a natural lighting condition of a protected cultivation greenhouse for 13 days. Morphological aspects were evaluated, such as fresh and dry mass, shoot height, root length and consumption of nutrient solution and water; biochemicals, such as synthesis of sugars, chlorophylls A, B and totals, and carotenoids; and physiological, such as quantum efficiency of photosystem II and SPAD index. From the results it was verified that wavelengths affected the morphology and physiology evaluated, but not all biochemical variables. Regarding morphology, blue + red treatment plants stood out in terms of fresh and dry root mass, shoot height and root length, however, the plants consumed more nutrient solution and water. Regarding biochemistry, plants of the blue and blue + red combination treatments stood out, providing a greater amount of chlorophylls a and total, as well as carotenoids, while the presence of white light resulted in plants with reduced sugars. Physiologically, the plants exposed to the monochromatic blue light treatment and blue + red combination showed better results in relation to the quantum efficiency of photosystem II, while for the SPAD index, the plants of these two treatments presented results similar to those exposed to the greenhouse condition. With the experiments, the influence of wavelengths on the morphological, physiological and biochemical responses of plants became evident, proving to be extasted with the research objectives and fostering new experiments in the areas in question.

Keywords: photosynthetic pigments, SPAD, chlorophyll fluorescence, indoor culture.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Tratamentos de luz artificial em que às plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) foram submetidas. A) Luz azul (T1), B) Luz branca (T2), C) Luz azul + vermelha (T3) e D) Luz vermelha (T4).21
- Figura 2 - Representação gráfica dos comprimentos de onda emitidos pelos painéis de Led's utilizadas no experimento com plantas de alface (*Lactuca sativa* L.). A) Luz azul (T1), B) Luz branca (T2), C) Luz azul + vermelha (T3) e D) Luz vermelha (T4).26
- Figura 3 - Desempenho morfológico em vista lateral de plantas de alface (*Lactuca sativa* L. cv. BSAC0055) aos 13 dias, submetidas a diferentes condições de iluminação. A) Luz Led azul (T1), B) Luz Led branca (T2), C) Luz Led azul + vermelho (T3), D) Luz Led vermelha (T4) e E) luz natural (T5).44
- Figura 4 - Desempenho morfológico em vista superior de plantas de alface (*Lactuca sativa* L. cv. BSAC0055) aos 13 dias, submetidas a diferentes condições de iluminação. A) Luz Led azul (T1), B) Luz Led branca (T2), C) Luz Led azul + vermelho (T3), D) Luz Led vermelha (T4) e E) luz natural (T5).44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações dos nutrientes na solução nutritiva utilizada no experimento. Dados em mg L ⁻¹	20
Tabela 2 - Diluições de D-Glucose para preparo da curva padrão. Dados expressos em microlitros (μl).	30
Tabela 3- Médias de massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca de raiz (MSR), altura de parte aérea (APA), comprimento de raiz (CR), consumo de solução nutritiva (CNS_SOL), consumo de água (CNS_AGUA), relação de biomassa produzida pelo consumo de solução nutritiva (B_CS), relação de biomassa produzida pelo consumo de água (B_CA) e relação do consumo de solução nutritiva pelo consumo de água (CS_CA) nas análises dos cinco tratamentos, além do coeficiente de variação (CV) de cada uma das variáveis.	43
Tabela 4 – Teores médios de açúcares solúveis totais (AST), clorofila <i>a</i> (CHL_A), Clorofila <i>b</i> (CHL_B), clorofilas totais (CHL_T), carotenoides (CAR) e massa fresca de parte aérea (MFPA), e coeficiente de variação (CV) de cada variável.	60
Tabela 5 - Médias de eficiência quântica do fotossistema II (MINIPAM) e índice SPAD (SPAD); e o coeficiente de variação (CV) de cada uma das variáveis.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A470 – Absorbância a 470 nanômetros	m – Metro
A645 – Absorbância a 645 nanômetros	MF – Massa fresca
A663 – Absorbância a 663 nanômetros	Mg – Magnésio
ATP – <i>Adenosine TriPhosphate</i>	mg – Miligrama
B – Boro	MINIPAM – Mini pulso de amplitude modulada
Ca – Cálcio	mL – Mililitros
Chl _a – Clorofila <i>a</i>	mLa mLs ⁻¹ – mililitro de água por mililitro de solução nutritiva
Chl _b – Clorofila <i>b</i>	Mn – Manganês
cm – Centímetro	Mo – Molibdênio
CR – Constante de redução;	NADPH - <i>Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate</i>
Cu – Cobre	NFT – <i>Nutrient film Technique</i>
DLI – <i>Daily Light Integral</i>	NH ₄ – Nitrato de amônio
DMSO – Dimetilsulfóxido	Ni – Níquel
ECl – EC da leitura	nm – Nanômetros
ECp – EC padrão definido para correção eglu. gMS ⁻¹ – Equivalente de glucose por grama de matéria seca	NO ₃ – Nitrato
Fe – Ferro	P – Fosforo
Fm – Fluorescência máxima	PSII – Fotossistema II
Fo – Fluorescência basal	<i>Q</i> – Densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos
Fv – Fluorescência variável	Rep água – Reposição de água
Fv / Fm – Rendimento quântico máximo do fotossistema II	Rep. Sol. – Reposição de solução
G – Gramas	rpm – Rotações por minuto
g MF mL a ⁻¹ – Gramas de massa fresca por mililitro de água	S – Enxofre
g MF mL s ⁻¹ – Gramas de massa fresca por mililitro de solução nutritiva	s – Segundo
I – Interferência de cada mL de solução concentrada em 1 litro de água;	SPAD – <i>Soil and plant analysis development</i>
K – Potássio	T1 – Tratamento 1
L – Litro	T2 – Tratamento 2
Led – Diodo emissor de luz	T3 – Tratamento 3
	T4 – Tratamento 4

T5 – Tratamento 5	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ – micromol por metro quadrado
UV-A – Ultravioleta A	por segundo
UV-B – Ultravioleta B	% - Por cento
V1 – Volume lido	[Si(OH) ₄] – Silicato de potássio
Vp – Volume padrão	± - Mais ou menos
Vp – Volume padrão definido para correção	Δv = Diferença de volume para o volume
Zn – Zinco	padrão
λ – Comprimento de onda	® - Marca registrada
μl – Microlitro	°C – Graus Celsius
μm – Micras	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	10
2	CAPITULO I – REVISÃO DE LITERATURA, O ESTADO DA ARTE.....	12
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	LOCAL E INFRAESTRUTURA.....	19
3.2	CULTIVAR E PRODUÇÃO DE MUDAS.....	19
3.3	SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	20
3.4	TRATAMENTOS.....	20
3.4.1	Tratamentos com luz artificial	21
3.4.2	Tratamento com luz natural.....	27
3.5	AVALIAÇÕES.....	27
3.5.1	Morfológicas.....	27
3.5.2	Bioquímicas	29
3.5.3	Fisiológicas.....	31
3.6	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
3.7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
4	CAPITULO II - INFLUÊNCIA DOS ESPECTROS LUMINOSOS NA MORFOLOGIA, USO DE NUTRIENTES E CONSUMO DE ÁGUA EM PLANTAS DE ALFACE (<i>Lactuca sativa</i> L.).....	40
4.1	INTRODUÇÃO.....	42
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.3	CONCLUSÕES	52
4.4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
5	CAPITULO III - IMPACTO DE ESPECTROS LUMINOSOS VARIADOS NOS PARÂMETROS BIOQUÍMICOS E FISIOLÓGICOS DE ALFACE (<i>Lactuca sativa</i> L.).....	56
5.1	INTRODUÇÃO.....	58
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
5.2.1	Variáveis Bioquímicas	60

5.2.2	Variáveis Fisiológicas	63
5.3	CONCLUSÕES	68
6	Conclusões e perspectivas:	73

1 INTRODUÇÃO GERAL

O sol é a principal fonte de luz natural do planeta. Por meio desta, a planta é capaz de controlar todos os processos relacionados a síntese e acúmulo de matéria seca (ALVARENGA *et al.*, 2003), e assim controla o padrão de crescimento e desenvolvimento. Luz pode ser considerada como uma forma de energia eletromagnética – radiação – e que pode ser originada tanto da radiação solar quanto da iluminação artificial por meio de lâmpadas (CASSARES e PETRELLA, 2001). A iluminação artificial tem sido muito usada como forma alternativa à luz solar, principalmente para a produção de alimentos.

As lâmpadas do tipo Led (*Light Emitting Diode* ou, no português, diodo emissor de luz) apresentam características únicas em relação às lâmpadas tradicionais (ROCHA, COFFY e HENRIQUE, 2016), possuindo elevada performance, baixo consumo energético, diversidade de comprimentos de onda e baixa temperatura (ZHANG *et al.*, 2018).

As luzes Led's tem sido usadas por promover o acúmulo de diferentes fitoquímicos, vitaminas, clorofilas e carotenoides (ZHANG *et al.*, 2020). Além disto o crescimento da planta e rendimento em biomassa também é favorecido pelo uso dos Led's (ROCHA, COFFY e HENRIQUE, 2016).

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das hortaliças folhosas de maior consumo e importância comercial no mundo, adaptando-se facilmente ao cultivo em ambientes *indoor*, além de ter ciclo curto, o que possibilita a experimentação com os mais diversos tipos de variáveis. Sua produção anual mundial aumentou na última década de 37 milhões de toneladas em 2009 para 45 milhões de toneladas em 2019 (FAOSTAT, 2021). No entanto, estudos recentes da ONU mostram que a população do mundo passará dos 9 bilhões de pessoas em 2050, sendo um grande desafio futuro, a produção de alimentos para estas pessoas (CARDIA e BORTOLASSI-JUNIOR, 2019). Com relação ao Brasil, em 2017 a produção ficou em torno de 671.509 toneladas (IBGE, 2020), visto que é consumida diariamente nas refeições como opção de salada, fazendo com que se torne a folhosa mais consumida no País.

Com a intenção de aumentar a rentabilidade dos cultivos, a estimulação dos fotorreceptores é tida como alternativa, pois é o ponto de partida para a coordenação de série de respostas fisiológicas (MUNEER *et al.*, 2014), sendo a absorção do vermelho e azul os principais responsáveis para tal fato (CARDIA e BORTOLASSI-JUNIOR, 2019).

A luz azul é a principal responsável pela síntese de clorofila e fotomorfogênese (LI e KUBOTA, 2009), além de favorecer o acúmulo de flavonoides e a síntese de antocianinas (HOFFMANN, NOGA E HUNSCHE, 2015). No entanto, variações entre o vermelho e azul

promovem diferentes expressões morfológicas nas plantas alface (SHAO *et al.*, 2020), como por exemplo, a massa, área e número de folhas. No caso a luz vermelha comanda a maioria das respostas fotoquímicas (SAEBO *et al.*, 1995), como precursora da fotossíntese e síntese de carboidratos.

Por outro lado, a luz também pode ser um fator de estresse quando fornecida de forma excessiva ou reduzida às plantas, sendo denominada estresse luminoso. Este tipo de estresse é o precursor para que aconteça a fluorescência da clorofila, forma que as plantas desenvolveram para lidar com este tipo de situação. Quando observadas mudanças na emissão da fluorescência da clorofila, há fortes indicativos de alterações na atividade fotossintética (BAKER e ROSENQVIST, 2004). Esta ferramenta tem sido cada vez mais utilizado em vista da sua ação não destrutiva de plantas, podendo fornecer diversas respostas sem perda amostral. Analisando a fluorescência, pode-se verificar a eficiência do fotossistema II, assim mostrando também a eficiência da assimilação do CO₂ atmosférico (FALQUETO *et al.*, 2007).

Diante disto, pode-se verificar que as respostas fisiológicas são totalmente moduladas de acordo com o comprimento de onda absorvido, sendo principalmente influenciado pelo vermelho e azul (CARDIA e BORTOLASSI-JUNIOR, 2019), gerando diferentes resultados em relação a composição de antioxidantes, pigmentos fotossintéticos, açúcares e fluorescência da clorofila. Ademais, o uso de diferentes cores de iluminação tem sido utilizado com maior intensidade nos últimos anos no contexto hortícola, podendo ser provido por malhas de sombreamento coloridas (PINHEIRO, 2013) ou lâmpadas em diferentes comprimentos de onda (SILVA *et al.*, 2016).

Com base nas informações supracitadas, este estudo objetivou-se em analisar o impacto de diferentes comprimentos de onda gerados por iluminação artificial no crescimento e desenvolvimento da alface (*Lactuca sativa* L.). O trabalho foi dividido em três capítulos distintos: O primeiro capítulo apresentou uma revisão abrangente do estado da arte sobre o tema proposto, enquanto os capítulos dois e três detalharam os resultados obtidos a partir da realização dos experimentos.

2 CAPITULO I – REVISÃO DE LITERATURA, O ESTADO DA ARTE

A alface (*Lactuca sativa* L.) pertence à família Asteraceae e é uma das hortaliças folhosas de maior consumo e importância comercial no mundo (VENZON e PAULA JÚNIOR 2007). É uma planta anual originária do Sul da Europa e da Ásia Ocidental. A produção anual mundial de alface aumentou na última década de 37 milhões de toneladas em 2009 para 45 milhões de toneladas em 2019 (FAOSTAT, 2021). Em 2017, a produção brasileira ficou em torno de 671.509 toneladas (IBGE, 2020). Esta hortaliça faz parte da alimentação diária de muitos brasileiros por ser um alimento prático, não requerendo muitos processamentos antes do consumo. É também considerada como a folhosa mais consumida no Brasil (SANTOS *et al.*, 2008).

A disponibilidade de solos férteis e água vem sendo reduzida ao longo dos anos, aliada ainda a fatores climáticos extremos. Assim, a produção agrícola está cada vez mais desafiadora (KOZAI, NIU e TAKAGAKI, 2019), o que tem estimulado o cultivo de alface em ambientes protegidos. Ohse *et al.*, (2002) reitera que a alface é a principal hortaliça produzida nestes ambientes e nos sistemas de cultivo indoor – um dos tipos de cultivo protegido e que tem total controle sob as condições ambientais – visto sua alta capacidade de adaptação e rápido crescimento. Além do mais, neste tipo de ambiente, por se ter controle das principais variáveis climáticas, como temperatura, umidade do ar, radiação solar e ventos, consegue-se controlar o efeito de sazonalidade dos cultivos (SILVA, SILVA e PAGIUCA, 2014).

O crescimento das áreas de cultivo protegido foi expressivo, sendo que, na década de 90 havia uma área aproximada de 716 mil hectares, passando para quase 3,7 milhões de hectares no ano de 2010 (CHANG *et al.*, 2013). Em termos de cultivo *indoor*, o crescimento também foi acentuado, fornecendo emprego para 200 milhões de pessoas e suprimindo cerca de 20% de produção mundial de alimentos (CANAL RURAL, 2021).

Os cultivos em ambiente protegido têm grande relação com sistemas de hidroponia, técnica pela qual as plantas recebem solução nutritiva que contém os elementos minerais essenciais ao crescimento e desenvolvimento (FURLANI, 1998). Dentre as plantas conduzidas em hidroponia, a alface está entre as mais produzidas, provavelmente em decorrência do seu pioneirismo no sistema hidropônico no país (FERNANDES *et al.*, 2002).

Dentre as principais técnicas de hidroponia, tem-se o NFT (*Nutrient Film Technique*), na qual as plantas são cultivadas com suas raízes contidas em um perfil por onde a solução nutritiva fica em um estágio recirculante (RESH, 2012); e o Floating, onde as plantas ficam

mantidas em recipientes sem o uso de substratos e com as raízes completamente submersas em uma solução nutritiva não recirculante (BEZERRA NETO & BARRETO, 2012). Aliado ao floating, há também a técnica de mini-floating, desenvolvida pelo LabHidro, onde utiliza-se um recipiente de volume reduzido, projetado a apenas uma planta, e, para o caso da alface, não há necessidade de complementação da oxigenação da solução.

Todavia, mesmo que haja disponibilidade de inúmeros outros fatores, se não houver luz a planta não consegue completar o ciclo. Plantas são organismos fotossintéticos que necessitam absorver a radiação visível através dos pigmentos fotossintéticos para dar início as reações químicas da fotossíntese (COSTA, 2009). Os responsáveis pela absorção luminosa são os pigmentos fotossintéticos, estruturas moleculares capazes de interceptar a radiação solar e a converter em energia química. Nas plantas superiores, como o caso da alface, os pigmentos fotossintéticos encontrados em maior abundância são a clorofila a, b e carotenoides (TAIZ *et al.*, 2017), mas também há elevada concentração de flavonoides e antocianinas. Existem também os pigmentos acessórios, que atuam principalmente na modulação da expressão gênica, como os fitocromos, criptocromos, fotorreceptores UV-B e fototropinas (KERBAUY, 2004).

As clorofilas estão presentes em elevada concentração nos tilacóides, e quando passam pelo processo de excitação, culminam com a produção de ATP e NADPH, moléculas altamente energéticas utilizadas na síntese de açúcares e reações de fixação de carbono (TAIZ *et al.*, 2017). Os valores ótimos para que ocorra a excitação, são quando os fotossistemas I e II absorvem os comprimentos de onda de 700 e 680nm, respectivamente, sendo este o ponto onde haverá maior conversão de energia luminosa em bioquímica. Plantas superiores possuem de forma abundante as clorofilas a e b. As razões entre clorofila a e b, normalmente se encontram na faixa de 3:1, podendo ser variáveis de acordo com o nível de intensidade de radiação em que as plantas estão expostas (COSTA, 2009).

Outro pigmento de relevância na absorção de luz são os carotenoides. Os carotenoides absorvem luz na faixa dos 400 a 500nm e atuam como pigmentos acessórios as clorofilas, absorvendo a luz e transferindo a energia para as clorofilas metabolizarem em sua rota energética (TAIZ *et al.*, 2017).

Em relação aos pigmentos de menor concentração, encontramos os Fitocromos, que atuam na região do vermelho (650 a 680nm), vermelho extremo (710 a 740nm) e azul (425 a 490nm); Criptocromos, que atuam na faixa do azul (425 a 490nm) e UV-A (320 a 400nm); Fotorreceptores UV-B (280 a 320nm); e Fototropinas (400-500nm).

O fornecimento de radiação luminosa as plantas é o que permite com que elas cresçam e se desenvolvam, sendo que esta absorção pode ser advinda pela luz solar ou artificial. Quando tratamos de iluminação artificial fornecida as plantas, existem duas formas: a suplementação, onde as plantas recebem a luz do sol e são complementadas pelo fornecimento de luz artificial; e os sistemas *indoor*, onde as plantas crescem e se desenvolvem inteiramente com a absorção de luz artificial.

Dentre os tipos de iluminação artificial utilizados para sistemas de cultivo protegido, os mais comumente usados são os iodetos metálicos, sódio em alta pressão, e as lâmpadas incandescentes e fluorescentes (LAZZARINI *et al.*, 2017). No entanto, este tipo de lâmpada não é o ideal para as plantas, pois apresentam uma série de limitações, tais como elevado consumo de energia elétrica, alto custo, excessivo calor emitido e dificuldade de fornecer comprimentos de onda específicos (BULA *et al.*, 1991). Neste contexto, o avanço na tecnologia da produção de lâmpadas LED's fez com que esse material se tornasse promissor, pois é a primeira fonte de luz com capacidade de controle de intensidade e composição espectral (GUPTA e AGARWAL, 2017). No sentido de produção *indoor*, Bula *et al.* (1991) foram um dos primeiros a utilizar desta tecnologia, trabalhando com alface e encontrando resultados promissores.

Desde então, a utilização dos diodos emissores de luz foi cada vez maior, sendo utilizada para o crescimento de diversas culturas, tais como alface (LI e KUBOTA, 2009; OHASHI-KANEKO *et al.*, 2007; NAZNIN *et al.*, 2019), espinafre (OHASHI-KANEKO *et al.*, 2007; NAZNIN *et al.*, 2019), ervilha (WU *et al.*, 2007) e couve (NAZNIN *et al.*, 2019). Arriaga *et al.* (2020), ao analisarem plantas de alface exposta a diferentes comprimentos de onda verificaram um incremento significativo no conteúdo de antioxidantes quando utilizados os LED's vermelho e amarelo, bem como, melhores índices de clorofila utilizando as luzes vermelhas.

Em relação a morfologia também podem ser notadas algumas diferenças. Yanagi *et al.* (1996) verificaram que utilizando de luz vermelha as plantas aumentavam o número de folhas emitidas, enquanto Blaauw e Blaauw-Jensen (1970) observaram um aumento nas relações hídricas, troca de CO₂ e fototropismo ao se utilizar a luz azul.

Outro fator que merece atenção é a intensidade luminosa que as plantas devem receber. Nas condições naturais de cultivo, a céu aberto, a dificuldade de controle da luminosidade e intensidade luminosa é acentuada, visto que há diversos fatores, como chuva, nuvens e demais que podem barrar a chegada dos raios solares a terra. No entanto, o uso de LED's para

crescimento de plantas nos permite estudar a radiação luminosa em termos de qualidade, intensidade e fotoperíodo (KELLY *et al.*, 2020).

A quantidade ideal de luz que uma planta deve receber é medida pela integral de luz diária, do inglês DLI - *Daily Light Integral* (FAUST e LOGAN, 2018). Esta medida corresponde ao total do fluxo de fótons fotossinteticamente ativos, do inglês PPF - *Photosynthetic Photon Flux*, que a planta recebe no decorrer de um dia e que pode também ser chamada de radiação PAR (FAUST e LOGAN, 2018). Composto a DLI, tem-se a qualidade da luz, compreendida pelos comprimentos de onda (λ) recebidos pela planta; A intensidade luminosa, advinda da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (Q) recebida pela planta em um determinado período de tempo; E o fotoperíodo, que indica o tempo de iluminação diário que uma planta recebe (SILVA, 2021).

A qualidade de luz absorvida pelas plantas em ambientes *indoor* ainda não segue um padrão específico. Sabe-se que os mais influentes são os comprimentos de onda na faixa do vermelho e azul, pois são os principais captados pelos fotorreceptores e que geram a ativação da rota fotossintética e morfogênica da planta (CAVALCANTE, 2022). Proporções iguais entre vermelho e azul são capazes de propiciar o aumento de peso seco das plantas, embora não haja um estudo comprovando a melhor proporção entre os comprimentos de onda para alface (WANG *et al.*, 2016b). As radiações no espectro vermelho (660 e 730nm) são relacionadas, junto ao fotoperíodo, da regulação da floração (COCETTA *et al.*, 2017). Já as radiações no âmbito do azul (400 a 500nm) possuem uma maior interação com outros comprimentos de onda, além de promover crescimento radicular e aumento de fotossíntese (CAVALCANTE, 2022).

Quanto a intensidade luminosa, pode-se dizer que é a quantidade de radiação solar que chega a superfície foliar, é absorvida, e entra na rota metabólica da fotossíntese, podendo também ser expressa como o fluxo de fótons sinteticamente ativos recebidos pela planta. Intensidades luminosas acima de $1000\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ permitem um aproveitamento luminoso de apenas 25%, enquanto radiação solar abaixo de $100\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$, permite um baixo aproveitamento, na casa dos 80% (LONG *et al.*, 1994). Autores são controversos quanto as indicações de intensidade luminosa para alface, podendo variar de 400 a $600\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ quando se objetiva biomassa (FU *et al.*, 2012); e $250\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$ quando se objetiva uma produção comercial, visando equilíbrio entre produção de biomassa e consumo energético (ZHANG *et al.*, 2018).

O fotoperíodo, aliado aos dois fatores acima, carrega extrema importância nos ambientes de cultivo *indoor* (KANG *et al.*, 2013), podendo afetar o crescimento, rendimento

e qualidade nutricional de alfaces (SHEN *et al.*, 2014). O ciclo circadiano das plantas é controlado pelo fotoperíodo (HIGASHI *et al.*, 2016) e estudos demonstram que fotoperíodos de 12 a 18 horas são os que propiciam melhores desempenhos da cultura (URAIRI *et al.*, 2017; SILVA, 2021).

A interação entre os três fatores traz o reflexo de como a DLI atua nas plantas. Comprimentos de onda na faixa de absorção dos receptores são o primeiro ponto, mas que, normalmente não é variado nas situações de cultivo. A DLI, no entanto, pode ser variável quando se altera o fotoperíodo e a intensidade luminosa (VIRŠILĚ *et al.*, 2019). Para alface, os valores variam entre 12 e 13 mol m⁻² dia⁻¹ (ESTEVAM, 2016), que podem ser modulados em função do fotoperíodo.

Existem certas condições que podem fazer com que ocorra o excesso de luminosidade, o qual gera estresse e fotoinibição e/ou fotodegradação das moléculas envolvidas com a fotossíntese, sendo estes fatores um complexo conjunto de alterações metabólicas que culminam na inibição da atividade fotossintética (ALMENARA, 1998). A fluorescência da clorofila *a* tem sido utilizada como parâmetro para avaliação das condições de estresse, pois além de não-destrutiva, sua manipulação é facilitada e traz resultados altamente sensíveis, tanto qualitativos com quantitativos, referentes ao aparato fotossintético (FALQUETO *et al.*, 2007). Condições ambientais extremas afetam os tilacóide, alterando a eficiência da fotossíntese, inativando o fotossistema II e a cadeia de transporte de elétrons, responsáveis pela produção de ATP e NADPH₂ (KRAUSE e WEISS, 1991; COSTA *et al.*, 2003).

Como forma de verificação do rendimento quântico da fotossíntese, pode-se obter a relação F_v/F_m da planta. Esta medida pode ser obtida quantificação da fluorescência inicial (F₀); Fluorescência máxima (F_m); e Fluorescência Variável (F_v), aplicadas à equação:

$$F_v/F_m = \frac{F_m - F_0}{F_m}$$

A quantificação é possível pois, no estágio de fluorescência inicial - F₀, todos os centros de reação do PSII estão abertos (KRAUSE e WEISS, 1991), ou seja, é a situação onde a planta se encontra no escuro, sem nenhum complexo coletor de luz recebendo fótons e assim estando em seu estado basal. Ao receber um pulso luminoso, ocorre a redução da quinona A, e então tem-se o ponto de fluorescência máxima – F_m (TATAGIBA e PEZZOPANE, 2007). Por sua vez, F_v representa a passagem dos elétrons do FSII até a plastoquinona. Em condições ótimas, a planta possui relação F_v/F_m entre 0,75 e 0,85 (BOLHÀR-NORDENKAMPF *et al.*,

1989), enquanto índices inferiores demonstram danos no aparato fotossintético (BJÖRKMAN e DEMMING, 1987).

Os danos causados pelo excesso luminoso podem ser divididos em fotoinibição dinâmica e fotoinibição crônica. No primeiro caso, tem-se o desvio de energia para a dissipação em forma de calor, retornando ao estado normal após o fluxo de fótons regredir abaixo da saturação (ARAÚJO e DEMINICIS, 2009). A fotoinibição crônica, no entanto, segundo os mesmos autores, acontece quando o excesso luminoso danifica os fotossistemas e diminuem a eficiência quântica e a taxa fotossintética máxima.

A proteína D1, que faz parte do complexo proteico dos fotossistemas, é a principal afetada pelo excesso luminoso, pois possui alta labilidade e dano irreversível. Quando danificada, todo o aparato fotossintético fica comprometido, pois que não há carregamento dos elétrons entre os aceptores, até a formação da molécula energética. O uso de fluorímetro portátil é capaz de identificar o estado da maquinaria fotossintética, pois a fluorescência da clorofila *a* revela como está o estado do PSII (ARAÚJO e DEMINICIS, 2009).

Nas situações normais de absorção luminosa, 97% da luz absorvida é destinada a etapa fotoquímica; 2,5% são dissipados na forma de calor; e 0,5% são destinados a fluorescência (BOLHAR-NORDENKAMPF e OQUIST, 1993). Diante disto, a emissão da fluorescência pelas plantas é a segunda opção de válvula de escape a fotodegradação. A clorofila *a* - principal responsável por este fenômeno, absorve tanto a luz azul (430-450 nm) quanto a luz vermelha (~660nm). A luz azul possui comprimento de onda mais curto, tendo maior carga energética, deixando a clorofila altamente excitada e forçando a dissipação, a qual é feita pela emissão da fluorescência em comprimento de onda próximo ao vermelho (~668nm) (TAIZ *et al.*, 2017).

A iluminação – e conseqüentemente a *DLI* – afetam a quantidade de água e nutrientes consumidas durante o ciclo da cultura. Embora não localizada uma pesquisa referente a quantificação de consumo de água e solução nutritiva de acordo com os comprimentos de onda, objetivou-se avaliar estas variáveis, visto que elas são reflexo dos principais compostos que a planta necessita para sobrevivência.

A quantificação é possível através de modelo matemático. Considera-se uma solução concentrada padrão, e desta, cria-se o fator de diluição em água. Faz-se o mesmo para a água, cria o fator de concentração para a solução nutritiva. Com as constantes criadas, pode-se aplicar na equação abaixo e quantificar o consumo exato de solução nutritiva e de água por planta e por tratamento.

$$Rep.Sol. = \frac{\{ECp - [ECl - (CR * \Delta v)]\}}{\frac{(1000 * I)}{Vp}}$$

Outro fator influenciado pela *DLI* e os comprimentos de onda emitidos para as plantas é a produção de açúcares solúveis totais (AST) - ou simplesmente açúcares - nos tecidos foliares. Além da função de fonte de energia para os vegetais, os açúcares podem regular a morfogênese, diferenciação celular, floração, fotossíntese, glicólise e o metabolismo de nitrogênio (PESCADOR, 2004; SMEEKENS, 2000), e ainda atuar em diferentes fases da replicação do DNA (DELROT, ATANASSOVA e MAUROUSSET, 2000)

A qualidade de luz por si não exerce um papel específico na formação dos AST's, mas sabe-se que o comprimento de onda na faixa do vermelho é o que mais gera acúmulo deste composto nas células. A luz vermelha é mediada pelo fitocromo e é essencial na morfogênese foliar, acúmulo de carboidratos e síntese de compostos químicos (CHEN *et al.*, 2016; WANG *et al.*, 2016a; REHMAN *et al.*, 2017). Zhang *et al.* (2018) relatou encontrar maiores índices de açúcares em plantas cultivadas com influência dos Led's vermelhos. Índices maiores de frutose, glicose e sólidos solúveis totais também foram encontrados em plantas de alface cultivadas sob Led's vermelhos, na pesquisa efetuada por Chen *et al.*, (2019). Autores como Alves (2019) no entanto, encontraram maiores valores quando misturaram luz vermelha com azul e Lin *et al.* (2013) obtiveram resultados superiores quando utilizaram a mistura anterior, mas também a luz branca.

De fato, observa-se que a qualidade de luz não é um único fator responsivo para a produção de açúcares em plantas, pois os resultados são diversos e tendem a demonstrar que há a interação entre vários fatores para propiciar a síntese. A intensidade luminosa é um parâmetro que gera influência em diversas respostas bioquímicas, devendo ser melhor investigada para a produção de açúcares.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL E INFRAESTRUTURA

Os experimentos foram conduzidos no Núcleo de Pesquisas em Biotecnologia Vegetal (NPBV) e no Laboratório de Hidroponia (LabHidro) e as análises fisiológicas ocorreram no NPBV, com pequenos auxílios de outros laboratórios, todos pertencentes ao Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.2 CULTIVAR E PRODUÇÃO DE MUDAS

Todas as plantas de alface utilizadas foram provenientes de sementes peletizadas, sendo da cultivar BSAC0055 da empresa Blue Seeds, visto sua adaptação climática ao ambiente experimental, bem como a disponibilidade de sementes no LabHidro, o qual foi fornecedor das mudas.

A produção das mudas se iniciou com a semeadura, onde as sementes de alface foram depositadas em espuma fenólica¹, a qual serviu de base para a fixação das raízes e desenvolvimento inicial das plantas. Após a semeadura, as placas de espuma contendo as sementes foram alocadas em câmara de germinação, ambiente propício para o desenvolvimento das mudas, pois contém temperatura controlada ($30\text{ °C} \pm 2$), baixa umidade do ar e não há iluminação. Esta fase tem duração de 24 horas.

Em sequência, as células contendo as sementes em germinação foram destinadas à maternidade², onde receberam solução nutritiva de baixa concentração ($0,3\text{ decisiemens por metro} - \text{dS m}^{-1}$), que é a mais adequada para a necessidade nutricional inicial da espécie. Permaneciam nesse ambiente até a completa expansão das folhas cotiledonares, o que levou 7 dias, variando de acordo com as condições ambientais.

A fase de berçário³ dava sequência ao ciclo da cultura. Nesta, as lâminas de espuma fenólica eram separadas em células e cada célula assumia um furo da bancada, permanecendo 15 dias até atingir ponto de transplante (3 folhas completamente expandidas). Por ser uma fase de crescimento e desenvolvimento, o fornecimento de nutrientes era maior, variando a condutividade elétrica entre $0,9$ e $1,4\text{ dS m}^{-1}$.

¹ Produto inerte, obtido a partir de petróleo e que após processo industrial ganha formato semelhante às espumas convencionais.

² Nome denominado a fase da primeira semana de cultivo. O modelo da bancada é laminar, visando se adaptar às lâminas de espuma fenólica, mas seguem o conceito de *NFT*.

³ Nome denominado a fase de crescimento e formação da muda. Nesta, as células da lâmina são separadas uma das outras e alocadas em bancadas semelhantes a de produção comercial.

O restante do ciclo da cultura foi conduzido em esquema de mini-floating, onde a planta era alocada no vaso experimental e exposta a condutividade fixa $1,7 \text{ dS m}^{-1}$.

Ao final, o ciclo da cultura levou 35 dias para atingir o ponto desejado, sendo destinado a fase de análises destrutivas. As análises não destrutivas foram realizadas durante o período de crescimento exposto aos tratamentos.

3.3 SOLUÇÃO NUTRITIVA

A solução nutritiva utilizada (Tabela 1) foi a mesma utilizada pelo LabHidro, que tem como base a solução proposta por Furlani (1998), com alterações que proporcionam o melhor desenvolvimento vegetal.

Tabela 1 - Concentrações dos nutrientes na solução nutritiva utilizada no experimento. Dados em mg L^{-1} .

Macronutrientes							Micronutrientes						
NO ₃	NH ₄	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn	Ni
188,9	16,6	8,0	252,6	139,5	42,8	48,1	0,617	0,614	2,700	0,614	0,138	0,240	0,122

FONTE: Furlani (1998) adaptado por LabHidro (2021).

Além dos nutrientes mencionados na Tabela 1, utilizou-se Silamol[®] como fonte de silicato de potássio - ($\text{K}_2\text{O}_3\text{Si}$), na dosagem de 3 mL para cada 1000 litros de solução, com intuito de propiciar maior resistência a patógenos que possam acometer a cultura, bem como melhor desenvolvimento radicular.

3.4 TRATAMENTOS

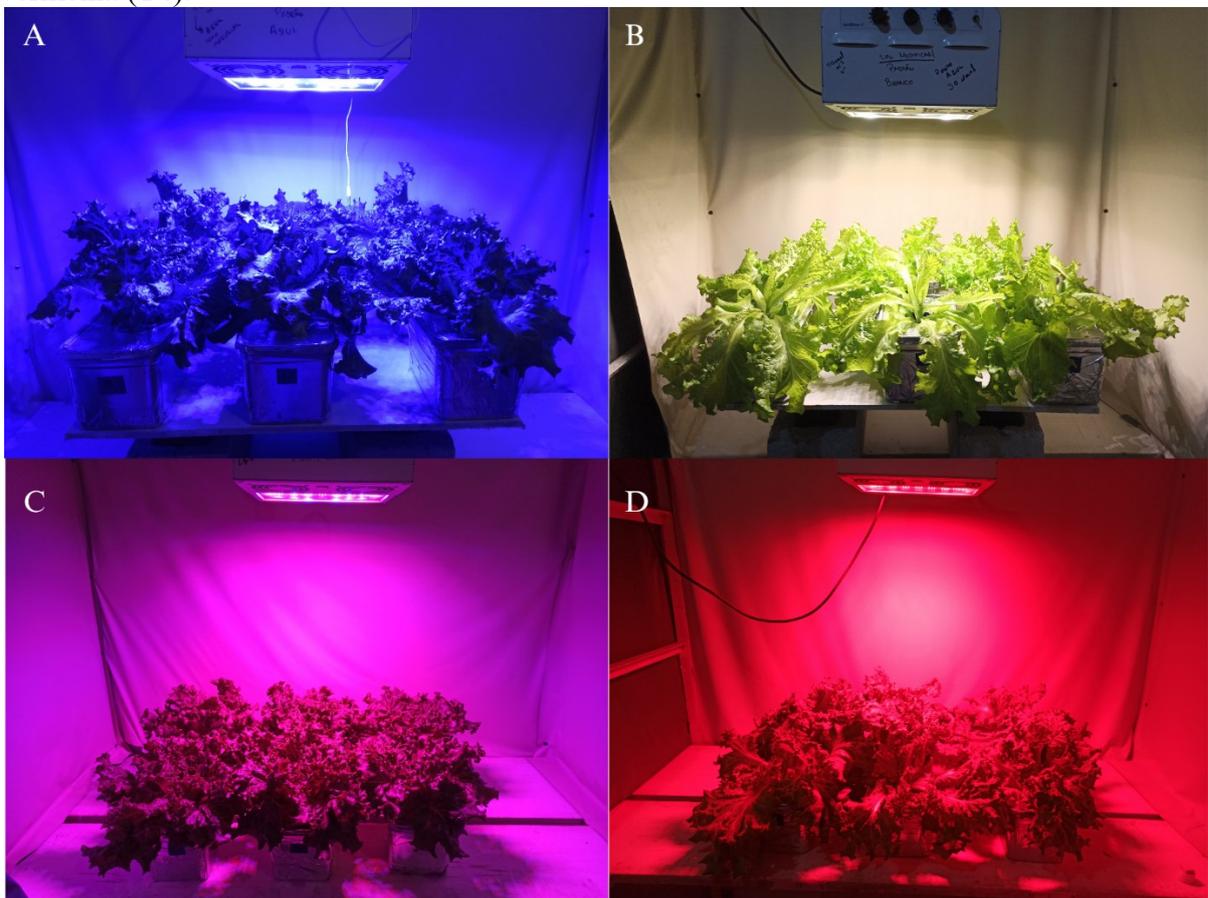
Foram utilizados cinco tratamentos, quatro deles com exposição à luz artificial e um às condições de iluminação natural de uma estufa agrícola. A produção de mudas seguiu o mesmo critério para os diferentes tratamentos, sendo diferenciados apenas quando expostos a condição de crescimento final. Utilizou-se de mudas onde as primeiras fases de vida (maternidade e berçário) foram conduzidas em ambiente com luz branca artificial (Led's comuns de mercado) a $120 \mu\text{mol m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Ao relacionar $13 \text{ mol m}^2 \text{ dia}^{-1}$ em função do fotoperíodo ótimo para geração de biomassa proposto por Silva (2021) de 18 horas, obtém-se um fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de $200 \mu\text{mol m}^2 \text{ s}^{-1}$, valor próximo ao limite que o modelo de lâmpada proposto neste experimento conseguia emitir.

3.4.1 Tratamentos com luz artificial

Os tratamentos com luz artificial foram promovidos utilizando as cores de luz: Azul (T1); Branca quente (T2); combinação de Azul + Vermelho 1:1 (T3); e Vermelho (T4) (Figura 1). Utilizou-se de painéis de Led produzidos pela empresa LumiGrow[®], fabricados com diodos de luz branca quente, azul e vermelha, integrados a um potenciômetro específico para cada diodo, podendo assim modular a intensidade luminosa e a cor utilizada.

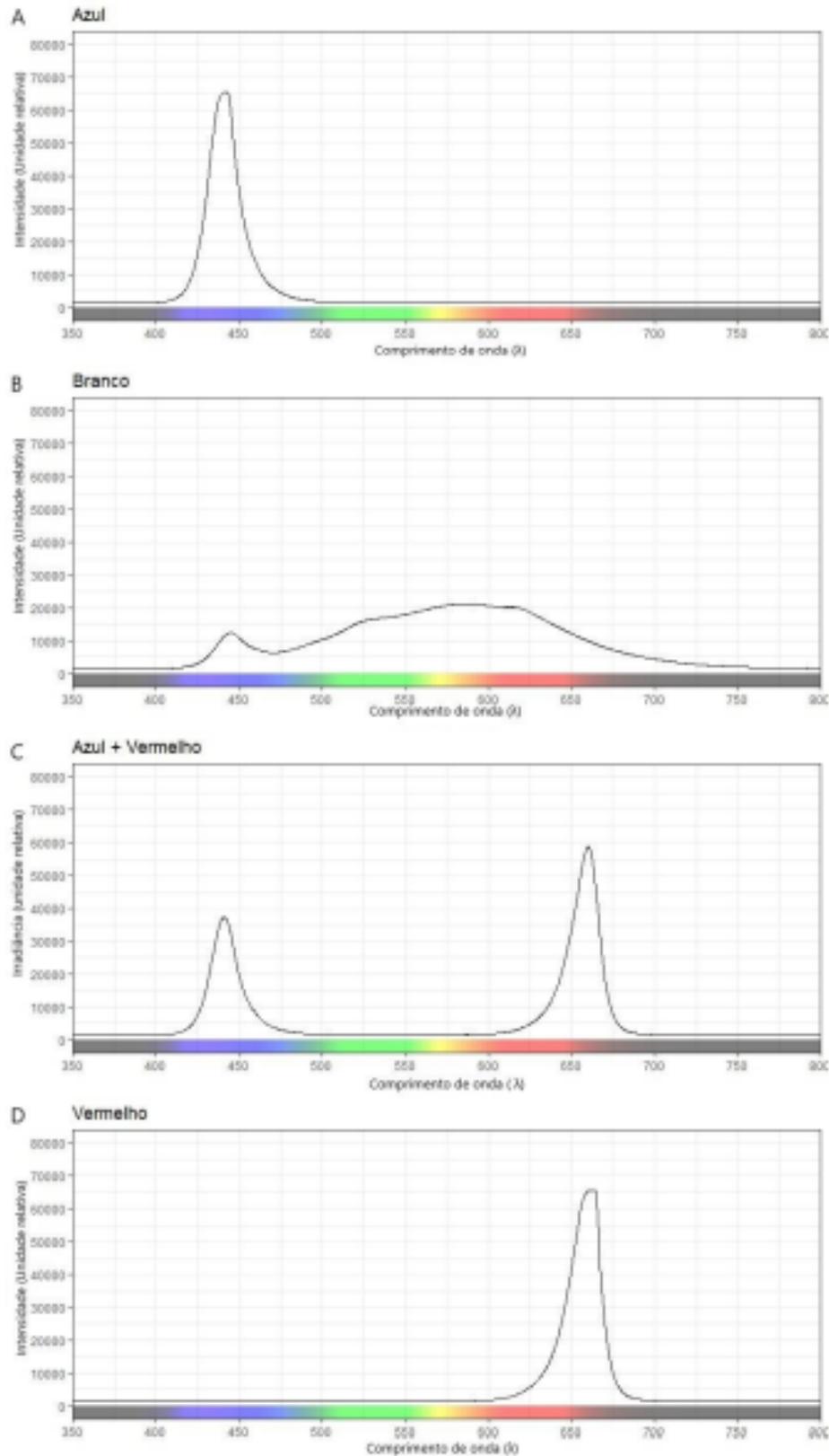
Figura 1 - Tratamentos de luz artificial em que às plantas de alface (*Lactuca sativa* L.) foram submetidas. A) Luz azul (T1), B) Luz branca (T2), C) Luz azul + vermelha (T3) e D) Luz vermelha (T4).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Cada tratamento teve sua cor quantificada por meio de espectrorradiômetro (Figura 2), com os picos de comprimentos de onda determinados como 665 nanômetros para vermelho e 442 nanômetros para azul, respectivamente. No caso do vermelho + azul, considerou-se os dois picos mencionados anteriormente. Para o branco, há-se a mescla de diversos comprimentos.

Figura 2 - Representação gráfica dos comprimentos de onda emitidos pelos painéis de Led's utilizadas no experimento com plantas de alface (*Lactuca sativa* L.). A) Luz azul (T1), B) Luz branca (T2), C) Luz azul + vermelha (T3) e D) Luz vermelha (T4).



Adotou-se um fotoperíodo de 18 horas de luz, com intensidade luminosa de $200\mu\text{mol m}^{-2}$, que juntos proporcionam uma DLI de $13\text{ mol m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$. Além do mais, com intuito de manter a homogeneidade na distribuição de luz, as plantas eram rotacionadas a cada dois dias, sendo feito a rotação da planta e dos vasos entre si. A temperatura do ar do ambiente foi controlada por condicionador de ar em $25^{\circ}\text{C}\pm 2$. Os tratamentos foram isolados um do outro através de cortinas do tipo “blackout”.

3.4.2 Tratamento com luz natural

O tratamento com luz natural (T5) foi realizado simultaneamente aos tratamentos de luz artificial, levando em consideração as condições de cultivo em uma estufa agrícola (casa de vegetação) revestida com filme de polietileno transparente de $200\mu\text{m}$ de espessura. A temperatura interna do ambiente teve variação de 15 a 40°C com temperatura média de 23°C e disponibilidade luminosa de aproximadamente 13 horas, com pico de intensidade luminosa variando de 950 a $1150\mu\text{mol m}^{-2}$ (dados amostrados esporadicamente).

3.5 AVALIAÇÕES

3.5.1 Morfológicas

As avaliações morfológicas foram realizadas somente ao final do ciclo, aos 13 dias de cultivo, uma vez que as mesmas eram destrutivas. As plantas foram colhidas e encaminhadas ao NPBV, onde foram mensurados os parâmetros de massa fresca de parte aérea (MFPA) e massa fresca radicular (MFR), sendo as duas partes separadas por corte na região do colo da raiz e posterior pesagem em balança analítica. Além disso, a altura da parte aérea (APA) e o comprimento da raiz (CR) foram medidos com uma régua. A massa seca da parte aérea (MSPA) e a massa seca da raiz (MSR) foram obtidos após a secagem das plantas em estufa aquecida a 70°C , durante três dias, tempo necessário para atingir a massa constante.

Houve também a quantificação do consumo de solução nutritiva e o consumo de água utilizado pelas plantas. Para que se conseguisse quantificar, a primeira solução era feita para as plantas utilizando um volume de 1200 mL de água e 200 mL de solução concentrada padrão, por vaso, resultando em um volume de 1400 mL e $1,70\text{ dS m}^{-1}$ de condutividade elétrica.

As quantificações aconteceram nos dias 2, 5, 7, 9 e 13 depois de terem sido feitas as leituras de SPAD. Para quantificação, verificava-se o índice de condutividade elétrica (EC) da solução, com auxílio de um condutivímetro portátil, e também do volume residual no reservatório, com o auxílio de uma proveta graduada.

Os valores lidos foram transcritos em uma tabela auxiliar, onde utilizou-se da seguinte equação para o cálculo da quantidade de solução nutritiva necessária para reestabelecimento do padrão do vaso:

$$Rep. Sol = \frac{\{ECp - [ECI - (CR * \Delta v)]\}}{\frac{(1000 * I)}{Vp}}$$

Onde:

ECp = EC padrão definido para correção;

ECI = EC da leitura;

CR = Constante de redução;

Δv = Diferença de volume para o volume padrão, em mL;

1000 = Valor padrão;

I = Interferência de cada mL de solução concentrada em 1 litro de água;

Vp = Volume padrão definido para correção, em mL.

Experimentos adicionais foram necessários, para que fosse possível determinar qual a influência de cada mL de solução concentrada em 1 litro de água. Para o experimento em questão, utilizou-se de uma solução padrão com 10,00 dS m⁻¹ e após montagem da curva de diluição, observou-se que cada mL solução influenciava em 0,0103 dS m⁻¹ mL⁻¹ dentro de 1 litro de água.

Também foi necessário o cálculo da constante de redução de condutividade elétrica, a qual visava quantificar a influência de cada mL de água na diluição de uma solução de trabalho, a 1,70 dS m⁻¹. Após experimentos de diluição, semelhante ao parágrafo anterior, definiu-se como constante de redução o valor de 0,00115 mL L⁻¹.

Para a correção do volume de água, apenas assumiu-se a diferença entre o volume de água lido e o volume padrão desejado (1400mL), repondo a quantidade necessária.

$$Rep. \acute{A}gua = Vp - Vl$$

Onde:

Vp = Volume padrão;

Vl = Volume lido.

Ao final, os resultados das duas equações indicavam o volume necessário de reposição de nutrientes e água, respectivamente. Após adicionados, uma nova checagem era realizada e o índice de condutividade elétrica condizia com o esperado, de 1,70 dS m⁻¹.

3.5.2 Bioquímicas

As análises bioquímicas foram efetuadas somente após a finalização dos ciclos de cultivo. Seu principal objetivo foi a quantificação de alguns pigmentos fotossintéticos (clorofila **a** clorofila **b**, clorofilas totais e carotenoides) e dos carboidratos solúveis totais que ficaram impregnados no tecido das plantas.

3.5.2.1 Pigmentos fotossintéticos

A determinação dos pigmentos fotossintéticos aconteceu ao final do ciclo da cultura, aos 40 dias de cultivo. A metodologia utilizada foi a de Hiscox e Israelstam (1979), levando em considerações algumas alterações para a cultura da alface. Coletaram-se amostras de 50mg de folhas novas e completamente expandidas de cada planta, sendo acondicionados em tubos de ensaio revestidos por papel alumínio e nestes, vertidos 5,0 mL de DMSO (Dimetilsulfóxido). Após, os tubos foram fechados e mantidos em banho-maria a 70°C por uma hora, até a dissolução total da clorofila. Aliquotas de 200 microlitros foram retiradas e acondicionadas em placa Elisa e lidas em leitor de microplacas (marca Molecular Devices, modelo SpectraMax Paradigm) para os comprimentos de onda de 663 nm para clorofila *a* (CHL-A), 645 nm para clorofila *b* (CHL-B) e 470 nm para carotenoides (CAR). Como branco, utilizou-se apenas DMSO.

Para a quantificação das clorofilas e carotenóides, em mg de clorofila por grama de matéria fresca (mg g⁻¹ MF), utilizou-se das equações propostas por Hiscox e Israelstam (1974).

$$\text{Clorofila } a = * \frac{((11,75 * A663) - (2,35 * A645)) * 50}{500}$$

$$\text{Clorofila } b = \frac{((18,61 * A663) - (3,96 * A645)) * 50}{500}$$

$$\text{Clorofila Total} = \text{Clorofila } a + \text{Clorofila } b$$

$$\text{Carotenoides} = \frac{((1000 * A470) - (2,27 * \text{Chl}_a) - (81,4 * \text{Chl}_b)) * 50}{227 \cdot 50}$$

3.5.2.2 Carboidratos Solúveis Totais

Para determinação dos açúcares solúveis totais, seguiu-se a metodologia de extração fenol-sulfúrica, proposta por Dubois *et al.*, (1956). Utilizaram-se as folhas do terço médio das plantas, retiradas ao final do ciclo da cultura e acondicionadas em tubos Falcon de 50 mL, guardados em ultra freezer em temperatura de 80 graus negativos. As amostras ficaram armazenadas até que o último bloco fosse colhido e então destinadas a liofilização, em um liofilizador da marca JJ Científica, modelo LJ UP, permanecendo no interior do mesmo até que a pressão de vácuo se tornasse constante, o que indica a retirada total da umidade. Após liofilizadas, as amostras foram previamente armazenadas em dessecador contendo sílica, a fim de evitar qualquer retenção de umidade.

As amostras foram moídas em triturador, que permitia com que as mesmas ficassem com granulometria baixa, semelhante à maceração com nitrogênio líquido. A massa amostral foi determinada de acordo com o equivalente de matéria seca por grama de matéria fresca. Para T1, utilizou-se 52,20 gramas; para o T2, 39,70 gramas; para o T3, 44,20 gramas; para o T4; 48,30 gramas e T5, 53,60 gramas.

Para o preparo do extrato, as amostras foram inseridas em tubos de ensaio juntamente com 2mL de etanol 80%, preparado antes da análise e mantido gelado. Os tubos foram destinados ao banho-maria a 70°C, durante o período de 5 minutos. Em sequência, foram centrifugados a 3000rpm por 10 minutos. O sobrenadante foi coletado e filtrado utilizando pipeta graduada, seringa e filtro de fibra de vidro, sendo o processo repetido em triplicata. O filtrado obtido (aproximados 6mL) foi completado para 10mL com etanol 80%. Todas as amostras foram acondicionadas em tubos com tampa roscável e armazenados em freezer a 20°C negativos até a próxima etapa.

Para curva padrão preparou-se uma solução padrão de glicose, utilizando 10mg/mL de D-Glucose (marca Sigma-Aldrich). A solução padrão foi diluída em doses escalonares segundo a Tabela 2, e a absorbância lida em espectrofotômetro UV-VIS.

Tabela 2 - Diluições de D-Glucose para preparo da curva padrão. Dados expressos em microlitros (μ l).

Dose (mg/mL)	D-Glucose	Água destilada	Fenol 5%	Ácido Sulfúrico	Volume final
0	0	500	500	2500	3500
10	10	490	500	2500	3500
20	20	480	500	2500	3500
40	40	460	500	2500	3500
60	60	440	500	2500	3500
80	80	420	500	2500	3500

Por fim, para quantificação dos carboidratos solúveis totais, utilizou-se de alíquotas de 50µl do extrato preparado anteriormente. As alíquotas foram inseridas em tubos de ensaio e neste adicionados, 450µl de água destilada, 500µl de fenol 5% e 2500µl de ácido sulfúrico concentrado (96%), nesta ordem respectivamente. Os tubos ficaram em repouso por 20 minutos, sendo após agitados em vórtex e lidos em espectrofotômetro com comprimento de onda de 490nm. O teor de carboidratos foi estimado de acordo com o equivalente de glicose, preparado na etapa de curva padrão.

3.5.3 Fisiológicas

Os parâmetros fisiológicos foram analisados com leituras ao decorrer dos ciclos de cultivo, observando acréscimo ou redução dos valores em relação as leituras de marco zero, ou seja, o dia de implantação do ciclo, em que todas estavam nas mesmas condições ambientais.

Como variáveis, analisaram-se a fluorescência da clorofila “a” do fotossistema II; o índice SPAD; e o consumo de solução nutritiva e água. Para realizar as leituras, utilizou-se de um fluorômetro portátil Mini-PAM (Heinz Walz GmbH); Clorofilômetro portátil SPAD – 502 (Konica Minolta Sensing); Condutivímetro portátil Dist4 (Hanna Instruments); e proveta graduada.

3.5.3.1 Mini-PAM

O fluorômetro Mini-PAM é um equipamento capaz de medir, dentre outros parâmetros, a fluorescência da clorofila “a”. Com intenção de verificar o estado da planta em relação a fluorescência, as leituras foram realizadas nos dias 0, 7 e 13. Para que fosse possível a quantificação de fluorescência, todos os fotossistemas eram aclimatados ao escuro, com as plantas sendo cessadas de luz pelo menos uma hora antes das leituras. No momento de leitura, o escuro era mantido, ficando apenas a luz da tela do computador acesa no local.

Cada planta era retirada de seu respectivo ambiente e cuidadosamente posicionada para que as leituras acontecessem. Folhas do terço médio eram marcadas e pinçadas em três locais, e os dados observados em tempo real para verificar a congruência entre os mesmos. Caso uma nervura ou folha danificada fosse pinçada, os valores destoavam dos outros e eram descartados e novas leituras realizadas. Por fim, o vaso era devolvido respectivo ambiente.

A fluorescência máxima (Fm), fluorescência inicial (F0) e o rendimento quântico do fotossistema II (relação Fv/Fm) foram obtidos automaticamente através do software Win-

Control 3, pertencente ao equipamento utilizado. O pulso de luz utilizado para que os fotossistemas fossem saturados foi de 7500 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}$.

3.5.3.2 SPAD

O índice SPAD, responsável por mostrar o status da planta em relação as condições ambientais e nutricionais, foi analisado nos dias 0, 2, 5, 7, 9 e 13. As leituras foram realizadas no local de cultivo das plantas, com ambiente iluminado. Folhas do terço médio foram selecionadas, identificadas e lidas. Por ser um parâmetro que costuma ter muita variação, leituras em triplicata foram realizadas e a média anotada, sendo que, caso obtivesse um valor destoante dos demais dentro de uma mesma planta, o mesmo era descartado. Os dados foram anotados e observado o acréscimo ou decréscimo de valores de acordo com a evolução do ciclo.

3.6 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, sendo que cada bloco foi considerado como um ciclo de cultivo. Os blocos continham cinco tratamentos e cada tratamento continha seis unidades experimentais, com uma planta cada. Ao final, obteve-se quatro blocos, com cinco tratamentos e seis unidades experimentais por tratamento, totalizando 120 plantas.

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e quando significativos os resultados, aplicou-se o teste de comparação múltipla de médias de Tukey ($p \leq 0,05$). Para isso utilizou-se o auxílio do software livre R, versão 4.2.3 (2023), com os pacotes `rio`, `metan`, `MASS`, `car` e `ExpDes.pt`.

3.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMENARA, M.R. Definição e ocorrência da fotoinibição. **LEAF**; 1998. Disponível em: <http://server2.iq.ufrj.br/~almenara/fotoinibicao.html>. Acesso em: 15 maio 2021.

ALVARENGA, A.A. de; CASTRO, E.M. de; LIMA JUNIOR, É. de C.; MAGALHÃES, M.M. Efeitos de diferentes níveis de luz no crescimento inicial e na fotossíntese de *Croton urucurana* Baill. no sudeste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 27, n. 1, p. 53-57, 2003.

ALVES, C. F. G. **Germinação, bioquímica e crescimento inicial de plântulas de Cereus jamacaru sob diferentes qualidades de luz**. 2019. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca - Al, 2019.

ARAÚJO, S.A. do C.; DEMINICIS, B.B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 463-472, 2009.

ARRIAGA, A. I. M.; GRANADOS, C. E. E.; TAVERA, V. M.; DÍAZ, G. M.; RUIZ, J. H.; NIETO, J. E. R. Antioxidant response of lettuce plants to four wavelengths of LED visible light. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 42, n. 12, p. 171-176, 2020.

BAKER, N.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, p. 1607-1621, 2004

BEZERRA-NETO, E.; BARRETO, L. P. As técnicas de Hidroponia. **Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**. Recife, p. 107-137. 2012.

BJÖRKMAN, O.; DEMMING, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. **Planta**, v. 170, p. 61-66, 1987.

BLAAUW, O.; BLAAUW-JANSEN, G. The phototropic responses of avena coleoptiles. **Acta Botanic Neer**. v. 19, p. 755-763, 1970.

BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R.; ÖQUIST, G. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. **Photosynthesis And Production In A Changing Environment**, [S.L.], p. 193-206, 1993.

BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R.; LONG, S. P.; BAKER, N. R.; OQUIST, G.; SCHREIBER, U.; LECHNER, E. G.. Chlorophyll Fluorescence as a Probe of the Photosynthetic Competence of Leaves in the Field: a review of current instrumentation. **Functional Ecology**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 497-514, 1989. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2389624>.

BULA, R. J.; MORROW, T. W.; BARTA, D. J.; IGNATIUS, R. W.; MARTIN, T. S. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. **HortScience**, Virginia, v. 26, n. 2, p. 203-205, 1991.

Canal Rural. Embrapa aposta em fazendas verticais que podem beneficiar a produção de alimentos. 2021. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/programas/embrapa-aposta-em-fazendas-verticais-que-podem-beneficiar-producao-de-alimentos/> Acesso em 23 de Maio de 2022.

CARDIA, L. H. B.; BORTOLASSI-JUNIOR, M. R. **Influência da iluminação artificial no cultivo do rabanete**. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Centro de Ciências Exatas, Agrárias e Tecnológicas, UNICESUMAR, Maringá, 2019.

CASSARES, N. C.; PETRELLA, Y. L. M. M. Influência da radiação de luz sobre acervos museológicos. **Anais do museu paulista: História e cultura material**, v. 8, n. 1, p. 177-192, 2001. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/anaismp/article/view/5373>. Acesso: 22 out. 2021.

CAVALCANTE, R. C. **Efeito de diferentes luminárias led na fotossíntese de alface cultivada em ambiente controlado**. 2022. 62 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Olericultura, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Morrinhos - Go, 2022.

CHANG, J.; WU, X.; WANG, Y.; MEYERSON, A. L.; GU, B.; MIN, Y.; XUE, H.; PENG, C.; GE, Y. Does growing vegetables in plastic greenhouses enhance regional ecosystem services beyond the food supply? **Frontiers In Ecology And The Environment**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 43-49, fev. 2013. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1890/100223>.

CHEN X. L.; WANG, L.C.; LI, T.; YANG, Q. C.; GUO, W. Z. Sugar accumulation and growth of lettuce exposed to different lighting modes of red and blue LED light. **Scientific Reports** 9:1-10, 2019.

CHEN, X. L.; XUE, X. Z.; GUO, W. Z.; WANG, L. C.; QIAO, X. J. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode. **Scientia Horticulturae** 200:111-118, 2016.

COCETTA, G.; CASCIANI, BULGARI, R.; MUSANTE, F. KOLTON, A.; ROSSI, M.; FERRANTE, A. Light use efficiency for vegetables production in protected and indoor environments. **The European Physical Journal Plus**, v. 132, n. 1, p. 1-15, 2017.

COSTA, C. T. da S. **Crescimento, Pigmentos Fotossintéticos e Produtividade de Cana-De-Açúcar (*Saccharum* sp.), no quarto ciclo de cultivo**. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Produção Vegetal e Proteção de Plantas, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2009.

COSTA, E. S.; BRESSAN-SMITH, R.; OLIVEIRA, J. G.; CAMPOSTRINI, E. Chlorophyll *a* fluorescence analysis in response to excitation irradiance in bean plants (*Phaseolus vulgaris* L. and *Vigna unguiculata* L. Walp) submitted to high temperature stress. **Photosynthetica**, v. 41, p. 77-82, 2003.

DELROT, S.; ATANASSOVA, R.; MAUROUSSET, L. 2000. Regulation of sugar, amino acid and peptide plant membrane transporter. **Biochimica et Biophysica Acta**, 1465: 281-306.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric Method for determination of sugars and related compounds. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350 – 356, 1956.

ESTEVAM, C. G. **Proposição para cultivo hidropônico em movimento para alface brunela**. 2016. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/155824/000889872.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 set. 2021.

FALQUETO, A. R.; CASSOL, D.; MAGALHÃES-JÚNIOR, A. M. de; OLIVEIRA, A. C. de; BACARIN, M. A. Características da fluorescência da clorofila em cultivares de arroz com ciclo precoce, médio e tardio. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 579-581, jul. 2007.

FAOSTAT, 2021. Crops and livestock products. **FAO**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso: 10 Fev. 2021.

FAUST, J. E.; LOGAN, J. Daily Light Integral: a research review and high-resolution maps of the united states. *Hortscience*, [S.L.], v. 53, n. 9, p. 1250-1257, set. 2018. **American Society for Horticultural Science**. <http://dx.doi.org/10.21273/hortsci13144-18>.

FERNANDES, A. A.; MARTINEZ, H. E. P.; PEREIRA, P. R. G.; FONSECA, M. C. M. Produtividade, acúmulo de nitrato e estado nutricional de cultivares de alface, em hidroponia, em função de fontes de nutrientes. **Horticultura brasileira**, v. 20, n. 2, p. 195-200, 2002.

FU, W.; LI, P.; WU, Y. E TANG J. Effects of different light intensities on anti-oxidative enzyme activity, quality and biomass in lettuce. **Horticultural Science**, v. 39 n. 3, p. 129-134, 2012.

FURLANI, P. R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia NFT**. Campinas, Instituto Agrônomo, 30p. (Boletim Técnico, 168), 1998.

GARG, N.; MANCHANDA, G. ROS generation in plants: boon or bane? **Plant Biosys** v. 143, n. 1, p. 81–96, 2009.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiol Biochem**, v. 48 n. 12, p. 909–930, 2010.

GUPTA, S. D.; AGARWAL, A. Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In.: Gupta S. D. (Ed) *Light emitting diodes for agriculture*. Singapore: **Springer**, p. 1-25, 2017.

HIGASHI, T.; AOKI, K.; NAGANO, A. J.; HONJO, M. N.; E FUKUDA, H. Circadian oscillation of the lettuce transcriptome under constant light and light–dark conditions. **Frontiers in plant science**, v. 7 n. 1, p. 1114, 2016.

HISCOX, J. D.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Canadian Journal of Botany**. v. 57, p. 1332-1334, 1979.

HOFFMANN, A. M.; NOGA, G.; HUNSCHE, M. Alternating high and low intensity of blue light affects PSII photochemistry and raises the contents of carotenoids and anthocyanins in pepper leaves. **Plant Growth Regul**, v. 79 n. 3, p. 275–285, 2015.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão/IBGE, 2020.

KANG, J. H.; KRISHNAKUMAR, S.; ATULBA, S. L. S.; JEONG, B. R.; E HWANG, S. J. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed-type plant factory system. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 54 n. 6, p. 501-509, 2013.

KELLY, N.; CHOE, D.; MENG, Q.; RUNKLE, E. S. Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod. **Scientia Horticulturae** v. 272 p.1-8, 2020.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Guanabara Koogan S.A., 2004.

KOZAI, T., NIU, G., TAKAGAKI, M. **Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production**. Academic Press. 516 p., 2019.

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. Annual Review Plant Physiology. **Plant Molecular Biology**, v. 42, p. 313-349, 1991.

LAZZARINI, L. E. S.; PACHECO, F. V.; SILVA, S. T.; COELHO, A. D.; MEDEIROS, A. P. R.; BERTOLUCCI, S. K. V.; PINTO, J. E. B. P.; SOARES, J. D. R. Uso de diodos emissores de luz (led) na fisiologia de plantas cultivadas – Revisão. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 2, n. 16, p. 137-144, 2017.

LI, Q.; KUBOTA, C.; Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. **Environ. Exp. Bot.** 67, 59-64. 2009.

LIN, K.-H.; HUANG, M.-Y.; HUANG, W.-D.; HSU, M.-H.; YANG, Z.-W.; YANG, C.-M. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 150, p. 86-91, fev. 2013.

LONG, S. P.; HUMPHRIES, S.; FALKOWSKI, P. G. Photoinhibition of Photosynthesis in Nature. **Annual review of plant physiology and plant molecular biology**, v. 45, n. 1, p. 633-662, 1994.

MUNEER, S.; KIM, E. J.; PARK, J. S.; LEE, J. H. Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). **International Journal of Molecular Science**, Basel, v. 15, n. 3, p. 4657-4670, 2014.

NAZNIN, M. T.; MARK L.; VALERIE G.; MD O. K. A. Blue light added with red LEDs enhance growth characteristics, pigments content, and antioxidant capacity in lettuce, spinach, kale, basil, and sweet pepper in a controlled environment. **Plants**, v. 8, n. 4, p. 93, 2019.

OHASHI-KANEKO, K.; TAKASE, M.; KON, N.; FUJIWARA, K.; KURATA, K. Effect of light quality on growth and vegetable quality in leaf lettuce, spinach and komatsuna. **Environmental control in Biology**, v. 45, n. 3, p. 189-198, 2007.

OHSE, S., NETO, D. D., MANFRON, P. A., E DURANTE, E. C. Composição centesimal, teor de vitamina C e de nitrato em seis cultivares de alface produzidas em quatro soluções hidropônicas. **Insula Revista de Botânica**, v. 31 n.1, 59-79, 2002.

PESCADOR, R. **Aspectos Fisiológico - Estruturais das Embriogêneses Zigótica e Somática de *Feijoa sellowiana* Berg (Myrtaceae)** São Paulo, SP: [s.n.], 2004.161 p.

PINHEIRO, R. R. **Malhas de sombreamento fotoseletivas no crescimento e produção de alface hidropônico**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS, 2013.

R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria.

REHMAN, M.; ULLAH, S.; BAO, Y.; WANG, B.; PEN, D.; LIU, L. Light-emitting diodes: whether an efficient source of light for indoor plants? **Environmental Science and Pollution Research** 24:24743-24752, 2017.

RESH, H. M. Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. **CRC Press**, 2012.

ROCHA, P. S. G.; COFFY, T. F. S.; HENRIQUE, S. **Diferentes intensidades de fluxo de fótons com lâmpadas led's no cultivo hidropônico de cebolinha**. XI ENCONTRO BRASILEIRO DE HIDROPONIA III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROPONIA, p. 87, 2016.

SAEBO, A.; KREKLING, T.; APPELGREN, M. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets *in vitro*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 41, p. 177-185, 1995.

SANTOS, A. O.; RIBEIRO NETO, B. L.; ZWIRTES, D. S.; SILVA, R. B.; YONENAGA, W. H. Produção de alface hidropônica: uma abordagem pela dinâmica de sistemas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS. v. 4, 2008. **Anais**. Centro Universitário de Franca, São Paulo. UNI-FACET, 2008.

- SHAO, M.; LIU, W.; ZHA, L.; ZHOU, C.; ZHANG, Y.; LI, B. Differential effects of high light duration on growth, nutritional quality, and oxidative stress of hydroponic lettuce under red and blue LED irradiation. **Scientia Horticulturae**, v. 268, p. 109366, jun. 2020.
- SHEN, Y. Z., GUO, S. S., AI, W. D., E TANG, Y. K. (2014). Effects of illuminants and illumination time on lettuce growth, yield and nutritional quality in a controlled environment. **Life Sciences in Space Research**, v. 2 n.1, p. 38-42, 2014.
- SILVA, B. A.; SILVA, A. R. da; PAGIUCA, L. G. **CULTIVO PROTEGIDO: em busca de mais eficiência produtiva!** 2014. Disponível em: https://www.cepea.esalq.usp.br/hfbrasil/edicoes/132/mat_capa.pdf. Acesso em: 09 mar. 2023.
- SILVA, E. M.; COSTA, G. G. S.; ANDRADE, A. F.; FERREIRA, H. C. P.; STEINER, F. Light Spectral Quality on Production of Lettuce, Cucumber and Sweet Pepper Seedlings. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 15, n. 4, p. 446-452, 2016.
- SILVA, L. de M. **Manejo da iluminação em cultivo indoor de alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2021. 43 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, 2021.
- SMEEKENS, S. 2000. Sugar – induced signal transduction in plants. **Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, 51: 49-81
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 888 p., 2017.
- TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M. Cinética de emissão de fluorescência das clorofilas em dois clones de *eucalyptus*. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 5, n. 10, p. 1-14, ago. 2007.
- URAIRI, C., SHIMIZU, H., NAKASHIMA, H., MIYASAKA, J., E OHDOI, K. Optimization of lightdark cycles of *Lactuca sativa* L. in plant factory. **Environmental Control in Biology**, v. 55 n. 2, 85-91, 2017.
- VENZON, M.; PAULA-JÚNIOR, T. J. **101 culturas: Manual de tecnologias agrícolas**. EPAMIG, 2007.
- VIRŠILĖ, A.; BRAZAITYTĖ, A.; VAŠTAKAITĖ-KAIRIENĖ, V.; MILIAUSKIENĖ, J.; JANKAUSKIENĖ, J.; NOVIČKOVAS, A.; E SAMUOLIENĖ, G. Lighting intensity and photoperiod serves tailoring nitrate assimilation indices in red and green baby leaf lettuce. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 14, 6608-6619, 2019.
- WANG, J. LU, W.; TONG, Y.; YANG, E. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 250, 2016a.
- WANG, J.; XIN, T. Y.; CHANG, Y. Q. Effect of LED light with different ratios of red to blue light on photosynthesis and energy use efficiency for lettuce. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering** 34:234-240, 2016b.

WU, M.-C.; HOU, C.-Y.; JIANG, C.-Y.; WANG, Y.-T.; WANG, C.-Y.; CHEN, H.-H.; CHANG, H.-M. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. **Food Chemistry**, 101, 1753–1758, 2007.

YANAGI, T.; OKAMOTO, K.; TAKITA, S. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. **Acta Horticulturae**, [S.L.], n. 440, p. 117-122, dez. 1996.

ZHANG, X.; BIAN, Z.; YUAN, X.; CHEN, X.; LU, C. A review on the effects of light-emitting diode (LED) light on the nutrients of sprouts and microgreens. **Trends in Food Science & Technology**, v. 99, p. 203-216, 2020.

ZHANG, X.; HE, D.; NIU, G.; YAN, Z.; SONG, J. Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 11:33-40, 2018.

4 CAPITULO II - INFLUÊNCIA DOS ESPECTROS LUMINOSOS NA MORFOLOGIA, USO DE NUTRIENTES E CONSUMO DE ÁGUA EM PLANTAS DE ALFACE (*Lactuca sativa* L.)

RESUMO

O cultivo *indoor* tem ganhado cada vez mais espaço na cadeia produtiva de hortaliças, visto sua vasta possibilidade de cultivos e maleabilidade no fornecimento de condições propícias ao desenvolvimento de plantas. O cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) é altamente visado neste tipo de espaço, pois esta planta tem alta plasticidade na adaptação aos ambientes e por sua importância na alimentação de boa parte da população mundial. Com o intuito de verificar condições propícias para o desenvolvimento destas plantas, expôs-se exemplares da espécie sob os tratamentos de LED's monocromáticos de cor azul, branco quente, azul + vermelho, vermelho e ainda uma condição comparativa sob a luz natural. As plantas foram analisadas sob o aspecto de crescimento e desenvolvimento vegetal aos 13 dias decorridos após o transplante, com a mensuração da massa fresca e seca de parte aérea e raiz, altura de parte aérea e comprimento de raiz; e também sob o aspecto de consumo de solução nutritiva e água, com a somatória dos consumos ao longo do ciclo e relacionando estes com a produção de biomassa aérea. Com o trabalho, verificou-se que as condições de iluminação às quais as plantas foram expostas interferiram no crescimento e desenvolvimento da alface, bem como afetaram o consumo de solução nutritiva e água. Quanto ao crescimento e desenvolvimento, para massa fresca de parte aérea, plantas expostas aos LED's vermelho e combinação vermelho + azul se sobressaíram, enquanto que para massa seca de parte aérea apenas as plantas da combinação foram superiores. Em relação a massa fresca e seca de raiz, as condições de T3 e T5 formaram plantas maiores. Para altura de parte aérea, plantas expostas as luzes azuis, branca e vermelha obtiveram maior desempenho, enquanto que para comprimento de raiz, as luzes azul + vermelho, vermelho e luz natural formaram plantas com maior desempenho perante os outros tratamentos testados. Quanto ao consumo de solução nutritiva, plantas de T3 foram as que mais consumiram, mas plantas cultivadas em T2 foram as que demonstraram maior eficiência no uso da solução nutritiva. Para o consumo de água, plantas irradiadas por azul e combinação azul + vermelho lideraram, no entanto, a maior conversão em biomassa pode ser observado nas plantas expostas a luz vermelha. Por fim, a melhor otimização entre o consumo de solução nutritiva e água foi observada nas plantas expostas as condições de iluminação de azul + vermelho, vermelho e luz natural. Os resultados obtidos surtiram sucesso em relação ao esperado, sendo o melhor balanço obtido na condição de iluminação de luz azul + vermelha. Este estudo pode ainda contribuir para a expansão do cultivo de hortaliças em cultivos *indoor*, fornecendo informações quanto a performance produtiva de alface sob diferentes comprimentos de onda.

Palavras chave: Fotomorfogênese; Led's; nutrientes.

ABSTRACT

Indoor cultivation has gained more and more space in the vegetable production chain, given its vast possibility of cultivation and malleability in providing conditions conducive to plant development. The cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) is highly targeted in this type of space, because this plant has high plasticity in adapting to environments and for its importance in feeding much of the world's population. In order to verify favorable conditions for the development of these plants, specimens of the species were exposed under the treatments of monochromatic LEDs of blue, warm white, blue + red, red and also a comparative condition under natural light. The plants were analyzed under the aspect of plant growth and development at 13 days after transplantation, with the measurement of fresh and dry mass of shoot and root, shoot height and root length; and also under the aspect of consumption of nutrient solution and water, with the sum of the consumptions throughout the cycle and relating these with the production of aerial biomass. With the work, it was found that the lighting conditions to which the plants were exposed interfered with the growth and development of lettuce, as well as affected the consumption of nutrient solution and water. As for growth and development, for fresh mass of shoots, plants exposed to red LEDs and red + blue combination stood out, while for shoot dry mass only the plants of the combination were superior. Regarding the fresh and dry root mass, the conditions of T3 and T5 formed larger plants. For shoot height, plants exposed to blue, white and red lights obtained higher performance, while for root length, blue + red, red and natural light lights formed plants with higher performance compared to the other treatments tested. Regarding the consumption of nutrient solution, T3 plants were the ones that consumed the most, but plants grown in T2 were the ones that showed greater efficiency in the use of the nutrient solution. For water consumption, plants irradiated by blue and blue + red combination led, however, the highest conversion to biomass can be observed in plants exposed to red light. Finally, the best optimization between the consumption of nutrient solution and water was observed in plants exposed to lighting conditions of blue + red, red and natural light. The results obtained were successful in relation to the expected, being the best balance obtained in the condition of illumination of blue + red light. This study may also contribute to the expansion of vegetable cultivation in indoor crops, providing information on the productive performance of lettuce under different wavelengths.

Keywords: Photomorphogenesis; Led's; nutrients.

4.1 INTRODUÇÃO

No âmbito do ambiente de cultivo *indoor*, o cultivo de alface é muito procurado, devido sua versatilidade, rápido crescimento, elevado valor nutricional e baixa demanda de energia por planta produzida (OHSE *et al.*, 2002; LI e KUBOTA, 2009; LIN *et al.*, 2013). Nos últimos anos, a proximidade dos centros urbanos também tem sido um fator importante, ajudando a contornar perdas, custos de transporte e dificuldade de armazenamento (HE, *et al.*, 2020; DIEKMANN, GRAY e BAKER, 2020).

Diversos autores relataram estudos com esta espécie, utilizando principalmente Led's no espectro de cor azul, vermelho e branco. Normalmente, proporções maiores de vermelho em relação ao azul são utilizadas, pois esta é a situação que melhor harmoniza os aspectos relacionados a fotossíntese e crescimento das plantas (CAVALCANTE, 2022). Todavia, proporções iguais de azul e vermelho geram plantas com maior massa seca e eficiência no uso da luz, embora não haja uma proporção ótima entre as duas emissões de cores estabelecida para o cultivo de alface (WANG *et al.*, 2016b).

Diversos estudos foram realizados anteriormente com alface, verificando resultados superiores em relação a aparência, crescimento, desenvolvimento e aspectos nutricionais, utilizando LED's vermelhos, azuis e brancos (LIN *et al.*, 2013); aumento de biomassa, com LED's azuis e azuis com vermelho (JOHKAN *et al.*, 2012); aumento da biomassa e valores do índice SPAD com LED's azuis + vermelho (PINHO, JOKINEN e HALONEN, 2016), dentre outros.

Sabe-se que o comprimento de onda é capaz de influenciar fortemente na produção de biomassa e outros parâmetros no desenvolvimento das plantas, e, se há maior produção de biomassa, espera-se também que haja maior consumo de nutrientes do meio em que as plantas estão se nutrindo. Nas pesquisas constatadas na literatura, não há informações da quantificação do consumo de solução nutritiva e de água, quando utilizaram comprimento de onda como tratamento. Este parâmetro ganha importante relevância diante o fato que, relacionando-se a produção de biomassa em relação ao consumo de solução nutritiva e água, pode-se calcular a eficiência do uso de água, e assim determinar ambientes em que a planta possa crescer e desenvolver-se melhor, gastando menos insumos.

Assim, neste trabalho, objetivou-se quantificar as variáveis morfológicas que são respostas do crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como o uso e eficiência no consumo de água e solução nutritiva, quando as plantas foram expostas a diferentes condições de iluminação.

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 3), pode-se observar um maior destaque para plantas expostas ao tratamento que continha a combinação de luz azul + vermelha, pois esta foi a que propiciou desenvolvimento vegetativo superior, formou plantas mais compactas e dentro do padrão da espécie e obteve a melhor conversão de água e nutrientes em biomassa.

Tabela 3- Médias de massa fresca de parte aérea (MFPA), massa seca de parte aérea (MSPA), massa fresca de raiz (MFR), massa seca de raiz (MSR), altura de parte aérea (APA), comprimento de raiz (CR), consumo de solução nutritiva (CNS_SOL), consumo de água (CNS_AGUA), relação de biomassa produzida pelo consumo de solução nutritiva (B_CS), relação de biomassa produzida pelo consumo de água (B_CA) e relação do consumo de solução nutritiva pelo consumo de água (CS_CA) nas análises dos cinco tratamentos, além do coeficiente de variação (CV) de cada uma das variáveis.

Variável	Tratamento					CV (%)
	T1 [#]	T2	T3	T4	T5	
MFPA (g)	68,86 c*	51,67 d	109,32 a	107,37 a	78,97 b	3,82
MSPA (g)	3,59 c	2,05 d	5,24 a	3,81 c	4,23 b	3,16
MFR (g)	14,48 b	12,13 c	18,30 a	15,25 b	19,13 a	6,56
MSR (g)	0,60 b	0,39 c	0,88 a	0,70 b	0,90 a	6,96
APA (cm)	21,93 a	23,45 a	19,32 b	23,95 a	17,03 c	4,61
CR (cm)	20,42 ab	21,65 a	16,94 c	17,62 c	18,33 bc	6,54
CNS_SOL(mL)	142,28 d	90,46 e	218,69 a	187,37 b	162,12 c	5,04
CNS_AGUA(mL)	1280,00 a	685,83 c	1295,00 a	1079,17 b	1099,17 b	5,12
B_CS (g/mL**)	0,492 b	0,577 a	0,502 b	0,573 a	0,493 b	5,42
B_CA (g/mL***)	0,054 d	0,075 bc	0,085 b	0,100 a	0,072 c	5,86
CS_CA(g/mL****)	9,15 c	7,67 b	5,93 a	5,76 a	6,86 ab	8,93

[#]T1 (azul), T2 (branco), T3 (azul + vermelho 1:1), T4 (vermelho) e T5 (luz natural);

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade;

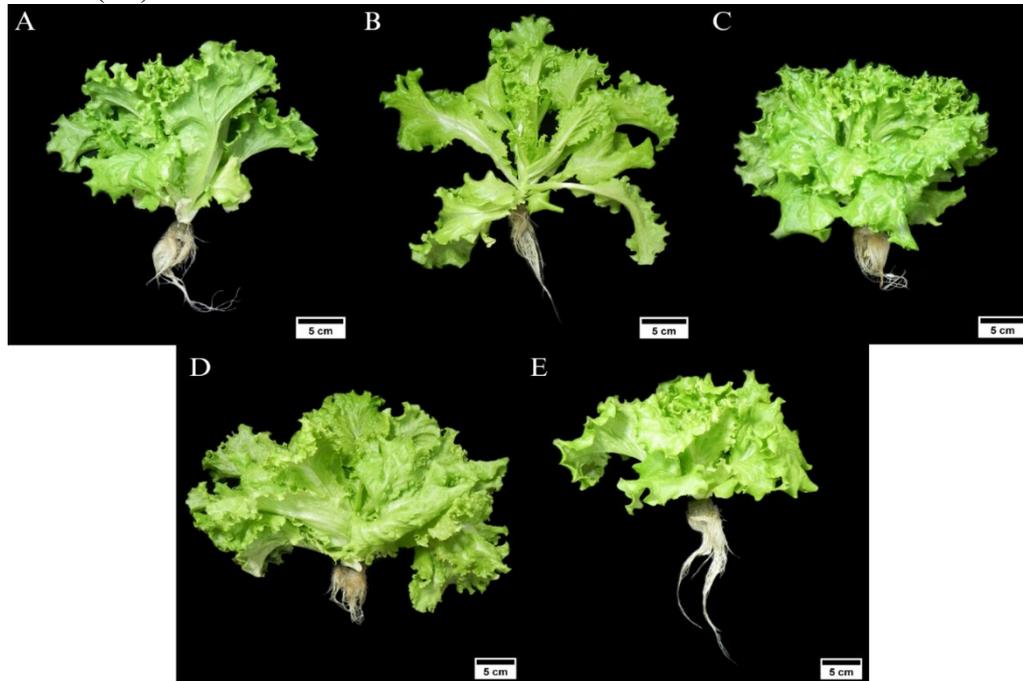
**gramas de massa fresca por mL de solução nutritiva;

***gramas de massa fresca por mL de água;

****mL de água por mL de solução nutritiva.

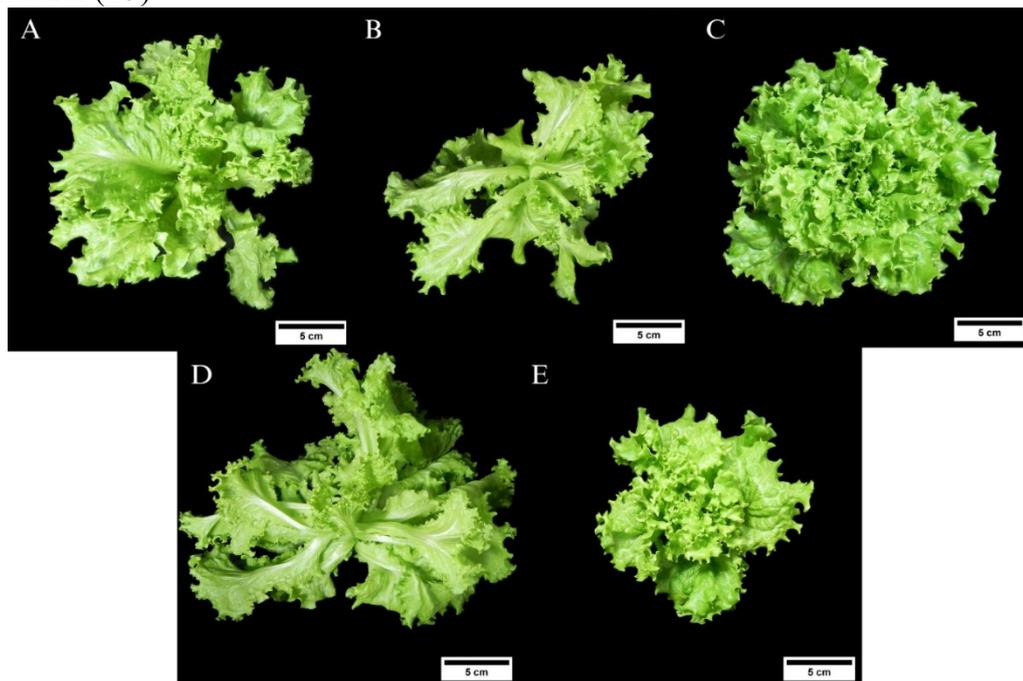
Constatou-se que ocorreu diferença para as plantas de alface submetidas às condições de iluminação (Tabela 3 e Figura 3), o que evidencia que a luz incidente sob o cultivo altera as características morfológicas das plantas, bem como no uso de nutrientes e consumo de água.

Figura 3 - Desempenho morfológico em vista lateral de plantas de alface (*Lactuca sativa* L. cv. BSAC0055) aos 13 dias, submetidas a diferentes condições de iluminação. A) Luz Led azul (T1), B) Luz Led branca (T2), C) Luz Led azul + vermelho (T3), D) Luz Led vermelha (T4) e E) luz natural (T5).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 4 - Desempenho morfológico em vista superior de plantas de alface (*Lactuca sativa* L. cv. BSAC0055) aos 13 dias, submetidas a diferentes condições de iluminação. A) Luz Led azul (T1), B) Luz Led branca (T2), C) Luz Led azul + vermelho (T3), D) Luz Led vermelha (T4) e E) luz natural (T5).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Massa fresca de parte aérea (MFPA)

Pode-se observar que as plantas de alface cultivadas sob luz azul + vermelha obtiveram a maior MFPA, com 109,32g, seguidas das submetidas ao vermelho (107,37g). A média de massa fresca das plantas submetidas à luz natural foi de 78,97g, diferindo das plantas expostas à luz azul, que apresentaram uma massa fresca média de 68,86g. O tratamento T2 apresentou a menor média de massa fresca, com 51,67g, o que representa uma redução de 2,16 vezes em relação à média do tratamento T4. Esses resultados demonstram a influência dos diferentes tratamentos de iluminação no crescimento das plantas de alface.

Plantas expostas a T3 e T4 desenvolveram-se na presença da luz vermelha, enquanto T5 foi cultivada sob iluminação natural. Valores superiores também foram encontrados por autores como Chen *et al.* (2011) e Amoozgar, Mohammadi e Sabzalian. (2017), nos tratamentos que continham a luz vermelha, e, de acordo com o obtido, pode-se verificar a importância da luz vermelha para os processos metabólicos e de uma forma mais proeminente na fotossíntese. Ademais, a luz vermelha diante deste papel, promove a produção das moléculas energéticas finais (NADHP e ATP) e que no ciclo de Calvin-Benson, formam a molécula de glicose (TAIZ *et al.*, 2017).

A luz branca se mostrou menos eficiente como fonte de luz, visto que as plantas ali presentes emitiram folhas totalmente estioladas, leves e quebradiças. Por mais que a luz branca seja uma composição de diversos espectros de luz, existem temperaturas de cor que influenciam de formas diferentes o desenvolvimento das plantas a elas expostas. A luz branca fria, normalmente com temperatura de cor de 6500K (Kelvin) é a mais adequada as plantas, enquanto a branco quente (4500K) emite comprimentos de onda que não possuem tamanha capacidade fotossintética tal como o vermelho e azul, diminuindo o efeito da fotossíntese líquida e síntese de metabólitos (SABZALIAN *et al.*, 2014).

As plantas do grupo de controle, por sua vez, estiveram sujeitas às condições ambientais vigentes na época. Registraram-se leituras com um pico de intensidade luminosa de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no momento de maior iluminação do dia. O fotoperíodo não foi controlado, mas, em média, houve 5 horas a menos de exposição à luz em comparação com as condições de cultivo indoor. A combinação desses fatores contribuiu para o desenvolvimento vegetal adequado das plantas, equivalente ao observado nos grupos T3 e T4. No entanto, é importante ressaltar que o desenvolvimento poderia ter sido ainda mais robusto se o Índice de Luz Diário (DLI) fosse equiparado ao das condições de cultivo indoor.

Massa Seca de Parte Aérea (MSPA)

Plantas submetidas ao tratamento T3 apresentaram a maior média de massa seca de parte aérea, com 5,24g, diferenciando-se do observado nos outros tratamentos. Plantas de T5, T4 e T1 obtiveram médias intermediárias, mas distintas dos extremos. As plantas que apresentaram a menor média em relação a matéria seca, foram aquelas submetidas ao tratamento T2, com um valor de 2,05g, diferente dos demais tratamentos e que representa apenas 48,5% em relação a ao maior valor médio.

As plantas superiores perante o acúmulo de MS foram às expostas a luz vermelha + azul. Resultados similares haviam sido observados por Okamoto, Yanagi e Kondo, (1997), quando utilizando estes espectros de luz. A luz azul atua na abertura e fechamento estomático, influenciando na regulação osmótica das células guarda (TAIZ *et. al.*, 2017). Em comparativo ao vermelho, o rendimento fotossintético da luz azul é maior, favorecendo também o acúmulo de matéria seca, porém, neste estudo, T1 e T4 apresentaram a mesma eficiência em relação aos valores médios de massa seca, não apresentando diferença estatística significativa.

Vale ressaltar, no entanto, que a luz vermelha monocromática não se torna adequada ao acúmulo de MS, pois propicia menor taxa de fotossíntese líquida e com isso o acúmulo de matéria seca fica dificultado (GOINS *et al.*, 1997). Em comparativo com o presente trabalho, o vermelho monocromático se classificou como terceiro tratamento mais eficiente.

Massa fresca de raiz (MFR) e massa seca de raiz (MSR)

Na análise a massa fresca de raiz (MFR), as plantas submetidas ao tratamento T5 apresentaram os maiores valores médios, com 19,13g, seguidas por aquelas submetidas ao tratamento T3, com 18,30g. De forma intermediária, demonstraram-se as plantas de T4 e T1. O menor resultado observado foi advindo de plantas do tratamento T2, de média 12,13g.

Por sua vez, para a massa seca de raiz (MSR), a maior média foi obtida por plantas de T5, com 0,90g, seguida por plantas de T3, com 0,88g. Medianamente, se observaram as plantas de T4 e T1. Oposto aos anteriores, obteve-se as plantas de T2, com 0,39g.

Iluminação em tons de azul + vermelho é favorecedor do acúmulo de MS, como o demonstrado para a parte aérea de planta, tendo em conta que o azul promove o regulamento estomático e o vermelho facilita o processo de fotossíntese. Estudos de Amoozgar, Mohammadi e Sabzalian. (2017) corroboram com isso e Wojciechowska *et al.* (2015) pode observar, além da condição acima, em situações de cultivo com iluminação natural.

Altura de parte aérea (APA)

Com relação aos valores médios de altura de parte aérea (APA) verificou-se que as plantas provenientes do tratamento T4, T2 e T1 apresentaram as maiores médias, com valor de 23,95cm, 23,45cm e 21,93cm, respectivamente. Plantas submetidas a T3 foram divergentes aos demais, com valores médios de 19,32cm. Em T5 foram registrados os menores valores médios das plantas, com 17,03cm de altura, sendo este 28,9% inferior ao valor médio mais alto obtido nas plantas de Alface.

O melhor ideótipo de plantas nem sempre se refere ao crescimento em altura. Esta resposta é decorrente do maior alongamento de entrenós no caule, e que sugere a suscetibilidade ao pendoamento (LIMA *et al.*, 2019; SANTOS, 2020). Outro fator relevante é que altura de planta não é sinônimo de acúmulo de MFPA e MSPA, como o observado em T1 e T2, onde ambos não se demonstraram superiores nesta variável.

O estiolamento é o desenvolvimento de brotos, ramos ou partes deles na ausência de luz, o que causa o crescimento dessas estruturas vegetais, geralmente alongado e com coloração amarela ou branca, em razão da ausência de clorofila (HARTMANN e KESTER, 1990). Esta condição é bastante evidenciada em plantas que estão passando por estresse por falta de complementação de todos os comprimentos de onda, sendo um processo desencadeado pelo fitocromo (TAIZ *et al.*, 2017). As condições mais severas de estresse fotossintético puderam ser observadas nas plantas de T2 e T4 (e que será abordado mais adiante), corroborando com os dados relativos a APA.

No tratamento T3, onde as plantas foram expostas à iluminação azul e vermelha, foi observado um ponto de equilíbrio entre o alongamento vertical e a produção de massa, indicando uma situação de cultivo ideal. O fato de esse tratamento ter alcançado o melhor equilíbrio de produção está relacionado provavelmente à presença das fototropinas - pigmentos que absorvem a luz azul - que juntamente com os fitocromos – pigmentos que absorvem luz vermelha - fazem controle da auxina, regulando o alongamento dos entrenós do caule (PAULILO, VIANA e RANDI, 2015). Já o tratamento T5 apresentou menor altura devido às condições ambientais às quais foi exposto, principalmente devido a um fotoperíodo mais curto em comparação às plantas cultivadas em ambiente *indoor*.

Comprimento de Raiz (CR)

Com relação ao comprimento de raiz (CR), plantas expostas a T3, T4 e T5 obtiveram as menores médias (16,94cm, 17,62cm e 18,33cm, respectivamente) e diferiram de T1 e T2 que possuíram os maiores comprimentos (20,42cm e 21,65cm, respectivamente).

O ideótipo de produção, neste caso, é obter plantas com o menor comprimento possível. Isso ocorre porque, uma vez que os recursos essenciais para a sobrevivência das plantas, como água e nutrientes, estão prontamente disponíveis, não há necessidade de investir energia no crescimento extenso das raízes.

Em T3, o balanço entre a luz azul e vermelha promoveu o menor alongamento das raízes e a emissão em maior número de raízes laterais, oposto do que foi observado em T1 e T2. O controle de emissão de raízes laterais está relacionado a atuação das citocininas (WERNER *et al.*, 2003), ao mesmo passo que o alongamento da raiz e diferenciação das raízes laterais são regulados pelas auxinas (TEALE *et al.*, 2005). A luz azul, pelo controle das fototropinas, consegue modular a concentração de auxina na planta, e diante da regulação hormonal antagônica que existe entre auxina e citocinina, as fototropinas podem inibir ou promover o desenvolvimento de raízes laterais.

Em T4, a luz vermelha monocromática propiciou raízes pequenas em comprimento. Os fitocromos atuam na captação da luz vermelha e quando a planta recebe única e exclusivamente este comprimento de onda, não são capazes de desenvolver grande número de raízes (AMOOZGAR, MOHAMMADI E SABZALIAN, 2017).

Em T5, as raízes foram de tamanho pequeno, sendo reflexo das condições ambientais em que a planta estava exposta, principalmente diante da DLI reduzida em comparação as condições *indoor*.

O maior prolongamento de raízes pode ser observado nas plantas dos tratamentos T1 e T2, nos quais a MFPA e MFR foram as menores. A comparação entre os parâmetros citados é justificada diante o fato de que a planta, em seu instinto de sobrevivência, por não conseguir obter aumento de massa aérea e emissão de maior número de raízes, acaba por alongar aquelas que já existiam em busca de condições melhores. Em *Arabidopsis*, observou-se que a proteína nuclear CRY1, ativada pela luz azul, atuava na regulação do alongamento de raiz (PATTARO, 2019). Outro regulador pode ser também a fototropinas, que também tem atuação evidenciada pela luz azul e podem ter ação nas raízes, contribuindo para o aumento de tamanho (PAULILO, VIANA e RANDI, 2015).

Consumo de solução nutritiva (CNS_SOL) e consumo de água (CNS_AGUA)

Para o consumo de solução nutritiva, as plantas expostas aos tratamentos diferem entre si. Como maior consumo, tem-se plantas de T3, com média de 218,69mL e menor consumo plantas de T2 com 90,46mL. É possível observar uma notável diferença, onde o líder obteve

2,42 vezes maior consumo. Em relação ao consumo de água, plantas de T3 e T1 possuíram o maior consumo médio (1295,00mL e 1280 mL por planta, respectivamente), enquanto o menor consumo foi observado nas plantas do tratamento T2, com 685,83mL.

Pode-se observar que aquelas que consumiram mais solução (T3) também foram as que apresentaram maior produção de massa fresca da parte aérea. Quanto ao consumo de água, tanto plantas submetidas ao T3 quanto o T1 obtiveram os maiores valores, porém em T3 se observou maior produção de biomassa.

É notável uma relação entre o maior consumo de água e solução nutritiva com a conversão em biomassa, exceto para o T1. Nas plantas desse tratamento, houve alto consumo de água, mas baixo consumo de solução nutritiva, o que foi refletido na MFPA. Para um melhor entendimento, podem-se analisar os dados das variáveis de biomassa produzida em relação ao consumo de solução nutritiva, biomassa produzida em relação ao consumo de água e consumo de solução em relação ao consumo de água.

Biomassa em relação ao consumo de solução nutritiva (B_CS)

Analisando a relação de massa fresca produzida e o consumo de solução nutritiva, observou-se as melhores conversões de massa fresca produzida por mL de solução nutritiva consumida foram encontradas em plantas de T2, com 0,577g MF mL s⁻¹ (gramas de massa fresca por mL de solução nutritiva) e T4= 0,573g MF mL s⁻¹. Diferente destes, as menores conversões foram observadas em plantas de T3, que produziu 0,502g MF mL s⁻¹; T5 com 0,493g MF mL s⁻¹ e T1 que produziu 0,492g.

Estudos relatam que a luz vermelha aumenta a atividade de enzimas como a nitrato redutase e nitrito redutase, reduzindo os teores de nitrato (SIGNORE *et al.*, 2020). Ao mesmo tempo que as enzimas têm maior atuação, o consumo de substâncias nitrogenadas se eleva, o que faz a planta requerer maior consumo de solução nutritiva. No presente estudo, comparando com os dados de CNS_SOL, as plantas de T4 tem um consumo 14,3% inferior ao T3, mas produziram apenas 1,95 gramas a menos (1,78%), o que reitera o fato de que não necessariamente o “alto” consumo de solução nutritiva irá converter em massa fresca.

Em T2, as plantas produzidas foram as que obtiveram a menor MFPA, mas em termos de conversão de solução nutritiva em biomassa, se equivaleram estatisticamente com plantas de T4. A condição de iluminação de luz branca quente (T2), apesar de conter uma gama diversa de comprimentos de onda, não conseguiu produzir plantas de elevada massa, como citado anteriormente, porém foi eficiente na transformação do que absorveu de nutrientes em MFPA.

Plantas de T1, T3 e T5 se equivalem estatisticamente como sendo menos eficientes em relação aos outros tratamentos. Em T1, as plantas, por terem meristema apical atrofiado durante o ciclo de cultivo, não obtiveram sucesso em elevar a MFPA, mas continuaram consumindo solução nutritiva, o que afetou negativamente o índice de B_CS. T3, apesar de conter as melhores plantas em relação a MFPA, não teve o melhor índice de conversão verificado. Em T5 foi possível observar que as plantas expressaram um elevado consumo de nutrientes, mas baixa conversão em MFPA, provavelmente devido as condições ambientais expostas.

Biomassa em relação ao consumo de água (B_CA)

Em relação a massa fresca produzida pela quantidade de água consumida (B_CA), o tratamento T4 foi mais eficiente, apresentando uma conversão de 0,100g MF mL⁻¹ (gramas de massa fresca por mL de água). Diferente deste, plantas de T3 e T2 e T5 não se destacaram positiva nem negativamente. O tratamento T1 conteve plantas que divergiram do restante e apresentaram a menor conversão, com apenas 0,054g MF mL⁻¹, um rendimento 46% inferior ao tratamento mais eficiente.

A melhor condição de cultivo foi o observado em T4, pois foi o tratamento no qual as plantas produziram mais massa por mL de água consumida. Este fato é devido a duas condições: primeiro, pois a produção de MFPA foi elevada, diante do favorecimento de fotossíntese que a luz vermelha propicia e que culmina com o maior acúmulo de matéria fresca; segundo, pelo menor consumo de água, a ponto de que as plantas cresceram com aspecto murcho e desidratado. Todavia, a desidratação não é proveniente da perda de água para o ambiente, pois neste caso a água teria sido absorvida pela planta e o índice de consumo de água seria maior, indicando assim que a luz vermelha inibe a absorção de água pelas raízes. O baixo consumo de água verificado neste tratamento pode ser diante a regulação dos estômatos feito através dos fitocromos, que apesar de 20 vezes menos eficiente que o controle estomacal feito por luz azul (PACHECO, LAZZARINI e ALVARENGA, 2021), pode ter ocasionado o fechamento de estômatos, diminuindo a transpiração e o consumo de água.

Nas plantas dos tratamentos T2, T3 e T5 se encontraram as condições medianas para B_CS. Em T2, as plantas, diante do baixo consumo de água (cerca de 50% do maior consumo) a produção de MFPA ficou defasada. Para plantas de T3 e T5, o desenvolvimento aéreo requisitou maior consumo de água, o que fez com que a conversão fosse boa, mas não suficientemente a melhor dentre os tratamentos.

Em T1 as plantas apresentaram a pior conversão para B_CA, onde foi notório o elevado consumo de água e que não pode ser convertido em MFPA, diante à necrose do meristema apical e consequente inibição do crescimento no decorrer do ciclo. Efeitos semelhantes puderam ser observados por Alves (2019), o qual verificou que plantas de *Cereus jamacaru* expostas a luz azul podem sofrer com alterações na propriedade celular e que culminam com o relaxamento da parede celular (KIGEL e COSGROVE, 1991; LIN *et al.*, 2013). Em comparativo a T4, plantas de T1 através da regulação da luz azul mantiveram seus estômatos abertos, o que propiciou maior transpiração e consumo de água.

Consumo de nutrientes em relação ao consumo de água (CS_CA)

Por fim, ao analisar a relação entre o consumo de solução nutritiva e o consumo de água, plantas dos tratamentos T4, T3 e T5 se destacaram como mais eficientes, consumindo 5,76, 5,93 e 6,86mL de água por mL de solução nutritiva, em média. O menor consumo foi registrado em plantas do tratamento T1, com consumo de 9,15mL. Pode-se dizer que plantas expostas a luz vermelha tiveram uma eficiência de conversão 37% maior, em relação ao azul.

Se tratando desta relação, o ideótipo é obter valores baixos, pois significa que necessitou-se absorver menos água por mL de solução. É possível observar que as plantas dos tratamentos com maior relação, foram também os que se destacaram para a produção de MFPA e MSPA, objetivando que os menores índices de CS_CA foram realmente efetivos na produção de alfaces com a maior massa fresca e seca.

As plantas de T1 foram as que obtiveram a menor conversão, onde os indivíduos obtiveram o segundo menor consumo de solução nutritiva aliado a um alto consumo de água. Isto indica que as plantas obtiveram alta transpiração e consumo de água para manutenção do metabolismo, mas que não foi eficiente em termos de produção de MFPA.

4.3 CONCLUSÕES

Neste estudo, concluiu-se que comprimentos de onda das luzes LED podem afetar o crescimento, desenvolvimento, consumo de água e solução nutritiva da alface. Em relação ao crescimento, as luzes azul + vermelho e vermelho foram mais eficazes para a massa fresca da parte aérea, enquanto apenas a luz azul + vermelho se destacou para a massa seca da parte aérea. Tanto azul + vermelho quanto vermelho foram os melhores para a massa fresca e seca da raiz. As luzes azul, branco e vermelho foram superiores para a altura da parte aérea, enquanto azul + vermelho, vermelho e luz natural foram melhores para o comprimento da raiz.

Em relação ao consumo de solução nutritiva e água, as plantas cultivadas sob luz azul + vermelho consumiram mais solução nutritiva, mas a conversão em massa fresca foi melhor com a iluminação branca. Para o consumo de água, as luzes azul e azul + vermelho se destacaram, mas a melhor conversão foi observada com a luz vermelha. A combinação de luz azul + vermelho, vermelho e luz natural apresentou a melhor otimização entre o consumo de água e solução nutritiva.

4.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. F. G. **Germinação, bioquímica e crescimento inicial de plântulas de Cereus jamacaru sob diferentes qualidades de luz.** 2019. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca - Al, 2019.

AMOOZGAR, A.; MOHAMMADI, A.; SABZALIAN, M. R. Impact of light-emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. grizzly. **Photosynthetica**, v.55, n.1, p.85-95, 2017.

CAVALCANTE, R. C. **Efeito de diferentes luminárias led na fotossíntese de alface cultivada em ambiente controlado.** 2022. 62 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Olericultura, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Morrinhos - Go, 2022.

CHEN, WH; XU, ZG; LIU, XY; YANG, Y; WANG, ZHM; SONG, FF. Effect of LED light source on the growth and quality of different lettuce varieties. **Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica** 31: 1434-1440, 2011.

DIEKMANN, L. O.; GRAY, L. C.; BAKER, G. A. Growing 'good food': Urban gardens, culturally acceptable produce and food security. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 35, n. 2, p. 169-181, 2020.

GOINS, G. D.; YORIO, N. C.; SANWO, M. M.; BROWN, C. S. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.48, n.7, p.1407-1413, 1997.

HARTMANN; H.T.; KESTER, D. E. **Propagacion de plantas: principios y praticas.** México: Compañia Editorial Continental, 1990. 760 p.

HE, W.; MIAO, C.; YOU, J.; XU, Z.G. Effects of Red and Blue Light with Supplemental White Light on Growth, Carbohydrate Metabolism, and Yield of VirusFree Potato in Plant Factories. **American Journal of Potato Research**, v. 97, n. 6, p. 554-564, 2020.

JOHKAN, M.; SHOJI, K.; GOTO, F.; HAHIDA, S.; YOSHIHARA, T. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 75, p. 128-133, 2012.

KIGEL, J.; COSGROVE, D. J. Photoinhibition of Stem Elongation by Blue and Red Light. **Plant Physiology**, [S.L.], v. 95, n. 4, p. 1049-1056, 1 abr. 1991.

LIMA, S. C. de; PEDROZA, J. P.; ALMEIDA, B. G. de; MELO, D. F. de; CARVALHO, R. de O. Produção de alface cultivada sob iluminação de diodos emissores de luz. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA. **Congresso.** Palmas – To, 2019.

- LI, Q.; KUBOTA, C.; Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. **Environ. Exp. Bot.** 67, 59-64. 2009.
- LIN, K.-H.; HUANG, M.-Y.; HUANG, W.-D.; HSU, M.-H.; YANG, Z.-W.; YANG, C.-M. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 150, p. 86-91, fev. 2013.
- OHSE, S.; NETO, D. D.; MANFRON, P. A.; DURANTE, E. C. Composição centesimal, teor de vitamina C e de nitrato em seis cultivares de alface produzidas em quatro soluções hidropônicas. **Insula Revista de Botânica**, 31(1), 59-79, 2002.
- OKAMOTO K.; YANAGI T.; KONDO S. Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light. **Acta Hort.** 435: 149-57, 1997.
- PACHECO, F.; LAZZARINI, L.; ALVARENGA, I. Metabolismo relacionado com a fisiologia dos estômatos. **Enciclopédia Biosfera**, [S.L.], v. 18, n. 36, p. 186-207, 30 jun. 2021. Centro Científico Conhecer. http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2021b14.
- PATTARO, Mariana Carmona. **A influência da luz azul na morfologia de plantas de alface cultivadas sob diferentes qualidades e intensidades de luz**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá - Pr, 2019.
- PAULILO, M. T. S.; VIANA, A. M.; RANDI, Á. M. Fisiologia Vegetal. Florianópolis: UFSC, 2015. 182 p. Disponível em: <https://antigo.uab.ufsc.br/biologia//files/2020/08/Fisiologia-Vegetal.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- PINHO, P.; JOKINEN, K.; HALONEN, L. The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce. **Lighting Res Technol.** p 1-16, 2016.
- SABZALIAN M. R.; HEYDARIZADEH P.; ZAHEDI, M.; BORROOMAND, A.; AGHAROKH, M.; SAHBA, M. R.; SCHOEFS, B. High performance of vegetables, flowers, and medicinal plants in a red-blue LED incubator for indoor plant production. **Agron. Sustain. Dev.** 34: 879-886, 2014
- SANTOS, C. P. dos. **Desempenho agrônômico e teor de clorofila na relação com absorção de água em alface**. 2020. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e Bioprocessos Associados, Universidade Federal de São Carlos, Araras - Sp, 2020.
- SIGNORE, A.; BELL, L.; SANTAMARIA, P.; WAGSTAFF, C.; VAN LABEKE, M.-C. Red Light Is Effective in Reducing Nitrate Concentration in Rocket by Increasing Nitrate Reductase Activity, and Contributes to Increased Total Glucosinolates Content. **Frontiers In Plant Science**, [S.L.], v. 11, p. 1-12, 14 maio 2020. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2020.00604>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 888 p., 2017.

TEALE, W.D.; PAPONOV, I.A.; DITENGOU, F.; PALME, K. Auxin and the developing root of *Arabidopsis thaliana*. **Physiologia Plantarum**, v. 123, n. 2, p. 130-138, 2005.

WANG, J.; XIN, T. Y.; CHANG, Y. Q. Effect of LED light with different ratios of red to blue light on photosynthesis and energy use efficiency for lettuce. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering** 34:234-240, 2016.

WERNER, T.; MOTYKA, V.; LAUCOU, V.; SMETS, R.; VAN ONCKELEN, H.; SCHMÜLLING, T. Cytokinin-Deficient transgenic *Arabidopsis* plants show multiple developmental alterations indicating opposite functions of cytokinins in the regulations of shoot and root meristem activity. **The Plant Cell**, v. 15, n. 11, p. 2532–2550, 2003.

WOJCIECHOWSKA, R.; DŁUGOSZ-GROCHOWSKA, O.; KOŁTON, A.; ŚUPNIK, M.. Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 187, n. 0, p. 80-86, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.006>.

5 CAPITULO III - IMPACTO DE ESPECTROS LUMINOSOS VARIADOS NOS PARÂMETROS BIOQUÍMICOS E FISIOLÓGICOS DE ALFACE (*LACTUCA SATIVA* L.)

RESUMO

A busca por plantas que se adaptem cada vez mais as diversas situações ambientais tem se intensificado nos últimos anos. Naturalmente, organismos vivos tem capacidade de se adaptar em busca da sobrevivência em uma nova condição, e as plantas são especialistas no crescimento nas mais diferentes condições de luz. Se em intensidade e qualidade adequada, a planta se desenvolverá sem restrições, no entanto, situações de déficit para um destes parâmetro acarretam na redução da produção de compostos secundários nas plantas. Em busca de entender as respostas bioquímicas e fisiológicas da alface (*Lactuca sativa* L.) em resposta a luz, expôs-se plantas desta espécie sob Led's monocromáticos de cor azul, branco quente, azul + vermelho, vermelho e ainda uma condição comparativa sob a luz natural. Analisou-se a produção dos açúcares solúveis totais, clorofila *a*, clorofila *b*, clorofilas totais, carotenoides, eficiência quântica do fotossistema II e o índice SPAD. Foi possível verificar que plantas expressaram diferentes comportamentos de acordo com as condições ambientais em que estavam expostas. Dentre as análises bioquímicas efetuadas, a produção de açúcares ficou reduzida apenas para plantas expostas ao Led branco quente. Em relação às clorofilas *a*, totais e carotenoides, Led's monocromáticos azul e azul + vermelho se destacaram, mas para clorofila *b* não houve distinção na produção, com as condições ambientais deste experimento. Perante as análises fisiológicas, o eficiência quântica do fotossistema II foi superior para plantas irradiadas com luz azul e luz natural, enquanto que para o índice SPAD, a luz azul + vermelha se sobressaiu juntamente com luz azul e luz natural. Os resultados obtidos demonstram que há modificações comportamentais de acordo com a condição de iluminação e é possível tomar direções para cultivar plantas com condições mais propensas ao seu desenvolvimento, principalmente trabalhando com espectros no âmbito do azul + vermelho complementares um ao outro.

Palavras chave: clorofilas, SPAD, eficiência do fotossistema II, *indoor*.

ABSTRACT

The search for plants that adapt more and more to the various environmental situations has intensified in recent years. Of course, living organisms have the ability to adapt in search of survival in a new condition, and plants are experts in growing in the most different light conditions. If in intensity and adequate quality, the plant will develop without restrictions, however, deficit situations for one of these parameters lead to a reduction in the production of secondary compounds in the plants. In order to understand the biochemical and physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in response to light, plants of this species were exposed under monochromatic Led's of blue, warm white, blue + red, red and even a comparative condition under natural light. The production of total soluble sugars, chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophylls, carotenoids, quantum efficiency of photosystem II and the SPAD index were analyzed. It was possible to verify that plants expressed different behaviors according to the environmental conditions in which they were exposed. Among the biochemical analyses performed, the production of sugars was reduced only for plants exposed to hot white Led. Regarding chlorophylls a, total and carotenoids, monochromatic blue and blue + red Led's stood out, but for chlorophyll b there was no distinction in production, with the environmental conditions of this experiment. Regarding the physiological analyses, the quantum efficiency of photosystem II was higher for plants irradiated with blue light and natural light, while for the SPAD index, blue + red light stood out along with blue light and natural light. The results obtained demonstrate that there are behavioral modifications according to the lighting condition and it is possible to take directions to grow plants with conditions more prone to their development, mainly working with spectra in the scope of blue + red complementary to each other.

Keywords: chlorophylls, SPAD, photosystem II efficiency, indoor.

5.1 INTRODUÇÃO

Plantas são organismos vivos capazes de se adaptar as condições ambientais em que estão expostas, gerando adaptações em nível celular visando sobreviver ao ambiente que estão expostas. Um dos principais parâmetros que modulam a expressão genica é a luz, e o conjunto de respostas da planta em decorrência da absorção dos comprimentos de onda é a fotomorfogênese (KAMI *et al.*, 2010; LUO e SHI, 2018).

Diversas respostas metabólicas podem ser moduladas de acordo com a intensidade, qualidade, periodicidade e direção da luz (KERBAUY, 2004). Plantas expostas a elevada intensidade luminosa podem ter labilidade da proteína D1, que atua no carregamento de elétrons entre os aceptores de luz no processo da fotossíntese (ARAÚJO e DEMINICIS, 2009). Quando o problema está na ausência ou baixa intensidade dos comprimentos de onda, os sintomas normalmente são estiolamento, baixo alongamento de limbo foliar e outros. A periodicidade, por sua vez, atua principalmente no ciclo circadiano da planta, identificando “dia e noite”, e plantas expostas a períodos curtos ou nulos sem luz, tem meristema apical com sintomas de necrose (SILVA, 2021). A direção da luz permite que a planta identifique sintomas de sombreamento, amanhecer e entardecer, pois nestes casos, a quantidade de raios na faixa de onda do vermelho distante é maior, o que gera respostas a nível dos fitocromos (KERBAUY, 2004).

Ao longo dos anos, ferramentas foram sendo desenvolvidas para quantificar e em posterior, mitigar os efeitos do estresse nas plantas. O fluorímetro é uma ferramenta capaz de quantificar a fluorescência da clorofila a e por consequência, verificar a integridade do aparato fotossintético (FALQUETO *et al.*, 2007). A relação F_v/F_m ótima às plantas se encontra na faixa dos 0,75 a 0,85 (BOLHAR-NORDENKAMPF e OQUIST, 1993). Valores abaixo ou acima indicam situações de estresse e desencadeiam as formas de proteção metabólica. Quando a planta se encontra em uma situação confortável, 97% da luz é destinada para a fotossíntese; 2,5% é transformado em calor; e 0,5% é reemitido como forma de fluorescência (BOLHAR-NORDENKAMPF e OQUIST, 1993). A fluorescência nada mais é do que a reemissão do fóton de luz em um comprimento de onda maior (668nm), que carrega menor estado de energia, assim conseguindo inibir o dano (TAIZ *et al.*, 2017).

A clorofila é uma das moléculas responsáveis por absorver a luz e a converter em energia química, na forma de ATP e NADPH (MARENCO e LOPES, 2005). Sintomas de deficiência podem ser identificados diante da coloração pálida e clorótica da folha, culminando

com redução da taxa fotossintética (LARCHER, 2006). Nas plantas superiores, os pigmentos fotossintéticos de maior importância são as clorofilas a e b e os carotenoides (TAIZ *et al.*, 2017).

Os carotenoides por sua vez, são pigmentos acessórios, que absorvem a luz azul e destinam ao processo de fotossíntese, otimizando as faixas de onda que não são captadas pelo fotossistema I e II (TAIZ *et al.*, 2017). Por sua principal absorção estar na faixa de 400 a 500 nm, plantas expostas a esta faixa de onda tem maior capacidade na síntese deste composto, como o encontrado por autores como Lin *et al.* (2013).

A quantificação das clorofilas e carotenoides é um parâmetro que pode ajudar na identificação de plantas com maior potencialidade de produção. Normalmente, estes pigmentos são quantificados através de métodos laboratoriais trabalhosos e demorados, que ainda culminam com a destruição do material vegetal (SALLA *et al.*, 2007). Todavia, para clorofilas, há possibilidade de uso do método indireto de quantificação de clorofilas através do SPAD (*Soil and Plant Analysis Development*), que surgiu como possibilidade para a não destruição do material vegetal. O SPAD é capaz de medir a quantidade de luz transmitida nos comprimentos de onda de 650 e 940nm, pontos onde a absorção pela clorofila é diferente (SALLA *et al.*, 2007), sendo considerado um método indireto de quantidade de clorofila na folha, utilizado como comparativo às análises químicas destrutivas.

Os açúcares solúveis totais (AST) são moléculas formadas ao final do ciclo de Calvin-Benson e desempenham um papel fundamental como reserva energética nas plantas (TAIZ *et al.*, 2017). Um maior teor desses compostos é desejável, pois contribui para o sabor mais agradável da alface. Estudos anteriores têm investigado a produção de açúcares em resposta a diferentes comprimentos de onda da luz, mas os resultados têm sido inconsistentes. Enquanto Chen *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2018) observaram valores mais altos em plantas expostas à luz vermelha, Alves (2019) relatou que plantas do gênero *Brassica* apresentaram maior teor quando expostas à luz azul, e plantas de *Cereus jamacaru* obtiveram melhores resultados com a combinação de luz vermelha e azul. Portanto, apesar de a maioria dos estudos mencionar a luz vermelha como a mais relevante, existe uma falta de consenso sobre o comprimento de onda ideal para maximizar a produção de açúcares na cultura da alface.

Desta forma, neste trabalho objetivou-se quantificar, através de alguns compostos, a variação bioquímica quando as plantas de alface são expostas a diferentes espectros de luz.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2.1 Variáveis Bioquímicas

De acordo com os resultados obtidos (Tabela 4), observa-se que plantas expostas ao azul e azul + vermelho foram as que se destacaram para a maioria das variáveis analisadas. Assim, a importância dos comprimentos de onda que foram destaque é evidente, pois formou plantas com tom mais esverdeado, teor de clorofilas, diante dos demais, e assim favoreceu acúmulo de massa.

Tabela 4 – Teores médios de açúcares solúveis totais (AST), clorofila *a* (CHL_A), Clorofila *b* (CHL_B), clorofilas totais (CHL_T), carotenoides (CAR) e massa fresca de parte aérea (MFPA), e coeficiente de variação (CV) de cada variável.

Variável	Tratamento					CV
	T1 [#]	T2	T3	T4	T5	
AST**	174,08 ab*	171,42 b	174,62ab	180,49 a	175,51 ab	1,73
CHL_A***	0,671 a	0,525 bc	0,636 ab	0,509 c	0,541 bc	9,07
CHL_B***	0,111 a	0,122 a	0,124 a	0,125 a	0,120 a	12,46
CHL_T***	0,782 a	0,648 c	0,760 ab	0,635 c	0,661 bc	7,11
CAR***	2,39 a	1,90 c	2,30 ab	1,83 c	2,05 bc	6,61
MFPA (g)	68,86 c	51,67 d	109,32 a	107,37 a	78,97 b	3,82

[#]T1 (azul), T2 (branco), T3 (azul + vermelho 1:1), T4 (vermelho) e T5 (luz natural);

* Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade;

** Expresso em equivalente de glucose por grama de matéria seca;

*** Expresso em miligramas por grama de matéria fresca.

Açúcares solúveis totais (AST)

Com base nos resultados expressos na Tabela 4, pode-se observar que as plantas expostas aos tratamentos T1, T3, T4 e T5 foram as que mais acumularam AST, não diferindo entre si, e apresentando valores de 174,08; 174,62; 180,49 e 175,51 gramas de equivalente de glucose por grama de matéria seca, respectivamente. Todavia, T1, T2, T3 e T5 são iguais entre si, mas diferem dos supracitados.

Os resultados obtidos foram não foram os esperados, visto que a síntese de açúcares na alface é influenciada pelo tipo e intensidade da luz (TAIZ *et al.*, 2017).

Na literatura, alguns autores verificaram que o acúmulo de açúcares nas plantas não segue um padrão único, com um comprimento de onda sendo mais específico para a síntese deste composto. Os teóres de açúcares de uma planta é influenciado por fitocromos e a luz vermelha (CHEN *et al.*, 2016; REHMAN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2019). Todavia, além do vermelho, outros comprimentos de onda também já mostraram destaque: Azul e Branco (LIN *et al.*, 2013); Azul e vermelho em *Cereus jamacaru* e Azul em *Brassica*

campestris L. e *Brassica oleracea* var. *acephala* (ALVES, 2019). O ultimo autor ainda reitera que o azul possa ser destaque devido a atuação das rotas metabólicas de desintoxicação das espécies reativas de oxigênio (ROS).

Para as plantas de T2, a síntese de açúcares foi inferior aos demais tratamentos, no entanto, o baixo desempenho morfológico observado (Figuras 3 e 4), atrelado aos menores valores de eficiência do fotossistema II (relação Fv/Fm), culminam com uma planta sem condições ideais de acúmulo de compostos secundários, e diverge do que encontrado por Lin *et al.* (2013), por exemplo.

Clorofilas (CHL_A, CHL_B e CHL_T) e carotenoides (CAR).

Em relação a clorofila *a* (CHL_A), observa-se que plantas submetidas a luz azul monocromática (T1) e azul + vermelho (T3) foram as que mais acumularam a molécula (0,671mg. g MF⁻¹ e 0,636mg. g MF⁻¹, respectivamente), não diferindo entre si, mas mostrando diferença estatística para as demais. Plantas de T2, T3 e T5 não apresentam diferença estatística significativa, e produziram teores médios. Todavia, a menor síntese foi observada em plantas de T4, com 0,509mg. g MF⁻¹.

Se tratando da clorofila *b* (CHL_B), as plantas expostas a todos os tratamentos se equivalem estatisticamente, mas em ordem decrescente de acúmulo se listam: T4, com 0,125mg. g MF⁻¹; T3, com 0,124mg. g MF⁻¹; T2, com 0,122mg. g MF⁻¹; T5, com 0,120mg. g MF⁻¹; e por fim T1 com 0,111mg. g MF⁻¹.

Em relação as clorofilas totais, as plantas expostas aos tratamentos T1 e T3 foram as que mais sintetizaram, com 0,782mg. g MF⁻¹ e 0,760mg. g MF⁻¹, respectivamente, não diferindo entre si, mas diferindo estatisticamente das demais. Todavia, T3 e T5 não divergem entre si, sendo que T5 sintetizou 0,661mg. g MF⁻¹. Da mesma forma, T5 não diverge de T2 e T4, que obtiveram 0,648mg. g MF⁻¹ e 0,635mg. g MF⁻¹.

Diante dos resultados encontrados para estes pigmentos no presente estudo, pode-se verificar que o ambiente luminoso em que as plantas estão expostas gera interferência na produção e acúmulo de pigmentos nos tecidos foliares. De fato, diversos autores relataram sobre esta afirmativa. Em experimentos realizados por Zhang *et al.* (2018) e Amoozgar, Mohammadi e Sabzalian (2017), trabalhando com alface (*Lactuca sativa* L.) e Cabral (2021), trabalhando com duas espécies de orquídeas brasileiras: *Gomesa flexuosa* e *Epidendrum denticulatum* foi possível verificar que as plantas alteraram a composição de clorofilas de acordo com as condições de iluminação em que estavam expostas.

Em relação a clorofila *a* e as clorofilas totais (Soma da CHL_A e CHL_B), os autores citados acima obtiveram maiores resultados em plantas expostas a combinação de cores vermelha e azul ou vermelho monocromático. Todavia, no presente experimento plantas do azul (T1) lideraram na presença de clorofilas e por mais que na mesma classe estatística, plantas expostas ao vermelho e azul (T3) obtiveram cerca de 5,21% a menos de CHL_A e 2,81% a menos de CHL_T.

A fase de vida da planta pode interferir na quantidade de clorofilas, como por exemplo a luz azul ser superior aos 17 dias, mas que aos 45 dias a maior composição passou para plantas irradiadas por Led's vermelhos (JOHKAN *et al.* (2010). A luz azul também foi superior a luz vermelha na indução da síntese de clorofila nas folhas primárias de cevada (*Hordeum vulgare*) (BUKHOV *et al.*, 1992). Ambas situações corroboram com os resultados do presente estudo.

A síntese de clorofilas é mediada por uma complexa cadeia de transformações metabólicas, que transformam o ácido glutâmico em clorofilas, tendo algumas etapas mediadas por luz (OLIVEIRA, 2023). A protoclorofilida é um composto intermediário, regulado pela absorção da luz azul e vermelha (ZUFFELATO-RIBAS, 2019), e que pode gerar interferência na quantidade de clorofilas de uma planta. Da mesma forma, o estresse sofrido por plantas expostas a luz é refletido na quantidade de clorofilas (VIEIRA, 1996), o que nos diz que a quantidade de clorofilas presentes nem sempre é dependente da capacidade da planta em sintetizá-las, mas sim da capacidade da planta em não ao degradar, quando em situações de estresse.

Com o presente experimento, pode-se verificar que plantas expostas a luz vermelha, branca e condição ambiental, obtiveram valores menores em relação a CHL_A e CHL_T. Para os dois primeiros citados, observa-se que foram tratamentos afetados pelo menor rendimento fotossintético, corroborado pela relação Fv/Fm, e que pode ter culminado com a degradação das clorofilas e redução da relação nestes tratamentos. Por sua vez, em T5 o menor fotoperíodo e conseqüente menor DLI podem ter causado os menores índices entre as variáveis analisadas.

A clorofila *b*, normalmente se encontra em uma proporção na faixa de 3:1, em relação a clorofila *a* (STREIT *et al.*, 2005), mas pode ser variável diante das condições ambientais. A clorofila *b* é derivada da clorofila *a*, após o grupo metil da clorofila *a* ser oxidado para um grupo aldeído (STREIT *et al.*, 2005), porém as rotas de formação ainda não estão totalmente elucidadas (TANAKA *et al.*, 1998). O fato de não haver diferentes acúmulos de clorofila *b* dentre os tratamentos não é algo inédito, como já visto em *Gomesa flexuosa* e *Epidendrum denticulatum* (CABRAL, 2021).

Carotenoides (CAR)

Em relação aos carotenoides, as plantas induzidas pelas luzes de T1 e T3 foram as que mais acumularam este composto, com 2,39mg. g MF⁻¹ e 2,30mg. g MF⁻¹, respectivamente, diferenciando-as dos demais tratamentos. Plantas expostas a condição de luz azul + vermelho (T3), no entanto, não se diferenciaram das plantas de T5, que acumularam 2,05mg. g MF⁻¹. Em T5 por sua vez, as plantas foram iguais as de T2, ficando com 1,90mg. g MF⁻¹ e as de T4, com 1,83mg g MF⁻¹.

Os carotenoides são pigmentos especializados na captação de luz azul e fotoproteção (TAIZ *et al.*, 2017), assim, espera-se que plantas que interceptadas por estes comprimentos de onda consigam sintetizar maior número de moléculas deste composto, bem como, sofrer menos danos por estresse luminoso.

Alves (2019) e Pattaro (2019) observaram maiores teores de carotenoides em plantas expostas ao azul; Jokhan *et al.*, (2010) quando expostas as plantas a esta luz, obteve os maiores valores de até os 17 dias de cultivo; já Amoozgar, Mohammadi e Sabzalian (2017) e Gonçalves (2019), verificaram valores maiores em plantas expostas ao azul + vermelho.

Todos os autores citados no parágrafo anterior reiteram que a maior produção do pigmento é devida a indução dos comprimentos de onda responsáveis pela luz azul. A faixa espectral do azul, por conter maior valor energético, favorece a absorção de energia pelos pigmentos acessórios e clorofila *b* (SCHULZE *et al.*, 2014). Os carotenoides atuam ainda na dissipação do excesso luminoso, prevenindo o estresse oxidativo, através da liberação de calor e/ou fluorescência da clorofila *a* (LAZZARINI *et al.*, 2017), o que pode ser corroborado com os dados analisados por MINIPAM, em que o tratamento de luz azul obteve as relações mais altas – mas dentro do padrão reiterado por Bolhár-NordenKampf e Öquist (1993) – na eficiência da fotossíntese (relação Fv/Fm).

5.2.2 Variáveis Fisiológicas

Na Tabela 5 são apresentados obtidos após as análises fisiológicas realizadas nas plantas de alface expostas as condições de iluminação. Os dados referem-se a média das leituras realizadas no último dia de cultivo (13º dia), e foram realizadas para a eficiência quântica do fotossistema II (relação Fv/Fm) e para o índice SPAD (*Soil and Plant Analysis Development*).

Tabela 5 - Médias de eficiência quântica do fotossistema II (MINIPAM) e índice SPAD (SPAD); e o coeficiente de variação (CV) de cada uma das variáveis.

Variável	Tratamento					CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	
MINIPAM	0,830 ab*	0,805 c	0,820 b	0,804 c	0,833 a	0,69
SPAD	24,89 a	14,65 c	25,01 a	17,47 b	23,85 a	3,5

#T1 (azul), T2 (branco), T3 (azul + vermelho 1:1), T4 (vermelho) e T5 (luz natural);

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Eficiência quântica do fotossistema II (MINIPAM)

Com base nos dados da Tabela 5, é possível observar que as plantas expostas aos tratamentos T1 e T5 apresentaram os maiores valores para a relação entre a fluorescência variável e a fluorescência máxima (Fv/Fm), sendo 0,830 e 0,833, respectivamente. As plantas submetidas ao tratamento T1, no entanto, não se diferenciaram de T3, ficaram classificadas em uma posição intermediária, com 0,820 e não divergiram dos outros tratamentos. Os valores mais baixos deste experimento foram obtidos pelas plantas dos tratamentos T2 e T4, distinto dos demais e apresentando uma média de Fv/Fm de 0,805 e 0,804, respectivamente, para ambas as condições de luz.

A eficiência quântica do fotossistema II é uma inferência a relação que existe entre a fluorescência variável (Fv) e a fluorescência máxima (Fm), sendo um parâmetro frequentemente usado para avaliar a saúde da planta em termos fotossintéticos, incluindo a alface. Os melhores valores para a relação Fv/Fm se concentram na faixa de 0,75 e 0,85, sendo que condições inferiores a este valor, podem ser indicativos de inibição da atividade do fotossistema II (BOLHÁR-NORDENKAMPF & ÖQUIST, 1993).

Portanto, com base nos valores obtidos da relação Fv/Fm, pode-se observar que, mesmo com fenótipos comportamentais distintos (conforme ilustrado nas Figuras 3 e 4) e plantas dos tratamentos T2 e T4 estioladas, não ocorre redução drástica na eficiência do fotossistema II, visto que os resultados obtidos se concentraram em torno de 0,8, o que está de acordo com as descobertas de Cavalcante (2022) em seu estudo sobre alfaces e Led's.

Ao final do ciclo de cultivo de 13 dias, os menores valores de eficiência quântica fotossintética foram observados em T2 e T4, correspondendo às condições de luz branca e vermelha, respectivamente. A ausência de luz azul inibe a atividade dos criptocromos e reduz a produção de clorofila, resultando em uma menor eficiência fotoquímica em plantas não expostas a esse comprimento de onda (LANDI *et al.*, 2020). O rendimento quântico de dissipação de energia (ϕDo) e o fluxo de dissipação de energia por centro de reação (DioRC)

revelam maiores valores sob Led's vermelhos, o que está em consonância com a redução no Fv/Fm para essa condição de iluminação (MARANI *et al.*, 2022).

Para as plantas de T2 – branco quente – os valores foram inferiores, mas pode estar diante da intensidade luminosa e temperatura de cor em que as plantas estavam expostas. Marani *et al.* (2022), encontrou resultados superiores para Fv/Fm, quando utilizando Led's azul, azul + vermelho e branco, todavia, possuía uma condição de iluminação de $400 \pm 20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (duas vezes o valor do presente experimento) e também trabalhou com outra espécie vegetal (*Alternanthera brasiliana* Kuntze), o que pode justificar a diferença. Os baixos valores de Fv/Fm afetaram de forma negativa as variáveis morfológicas (como observado nas Figuras 3 e 4) e bioquímicas (como observado na Tabela 4), com redução dos valores, exceto para altura de parte aérea, onde houve estiolamento e conseqüente elevação no tamanho, e para a clorofila *b*, onde não houve diferenciação estatística perante as demais.

Os tratamentos T1 e T5 foram aqueles nos quais as plantas apresentaram as menores condições de estresse no aparato fotossintético, uma vez que exibiram os maiores valores para a relação Fv/Fm. Além disso, as plantas do tratamento T1 apresentaram a maior síntese de carotenoides, enquanto as do tratamento T5 alcançaram valores intermediários. Essa observação é relevante porque os carotenoides desempenham um papel importante na proteção da planta contra o estresse luminoso, conforme mencionado por Lazzarini *et al.* (2017) e amplamente documentado na literatura, incluindo os estudos de Taiz *et al.* (2017).

No que diz respeito à iluminação combinando luz azul e vermelha (T3), autores como Centofante (2020) relataram que essa combinação foi a mais eficaz ao analisar *Campomanesia pubescens*. No entanto, é crucial destacar que as condições experimentais e as particularidades da cultura podem ter influenciado esse resultado, o que pode não ter sido reproduzido no presente estudo.

Índice SPAD

Com relação ao índice SPAD, os tratamentos de luz que apresentaram os valores mais elevados foram T3, com 25,01; T1, com 24,89; e T5, com 23,85, sendo estatisticamente semelhantes. O tratamento T2 foi a condição de luz que menos promoveu o índice SPAD, registrando valores de 14,65.

Analisando os resultados obtidos no último dia de ciclo (13º dia), observou-se que as plantas de alface dos tratamentos T1, T3 e T5, continham indivíduos com incremento no índice SPAD, quando comparados ao dia inicial. O SPAD é um parâmetro que mede indiretamente a

quantidade de clorofilas, apresentando correlação com a quantidade de nitrogênio (N) que a planta possui (YOKOHAMA *et al.*, 2018).

Plantas conduzidas no azul monocromático (T1) apresentaram os maiores índices SPAD juntamente com azul + vermelho (T3) e luz natural (T5). Vale salientar que as plantas de ambos tratamentos citados são as que menos sofreram com condições de estresse fotossintético e tal parâmetro pode gerar influência sob o índice SPAD, em casos de dano no aparato fotossintético.

No T1, ao correlacionar o índice SPAD com as análises de clorofila, especialmente a clorofila a, observou-se que os valores mais elevados foram obtidos quando a luz azul foi empregada. Além disso, observou-se um consumo significativo de solução nutritiva, o que possivelmente resultou em um maior acúmulo de nutrientes nas folhas, contribuindo para a síntese de clorofila. Shin *et al.* (2014) também obtiveram resultados semelhantes ao alcançar um índice SPAD de 25 ± 1 em plantas de alface usando apenas LEDs azuis, semelhantes aos utilizados neste estudo. No entanto, eles obtiveram melhores resultados ao combinar LEDs vermelhos e azuis. No presente experimento, as plantas expostas à luz azul + vermelha não mostrou vantagens significativas em comparação com as outras condições. É importante ressaltar que os autores mencionados utilizaram uma intensidade luminosa 50% maior do que a deste estudo, o que pode explicar a diferença observada. Por outro lado, as plantas do tratamento T5 foram expostas à luz natural, conforme mencionado anteriormente para outras variáveis, sem controle sobre a intensidade e qualidade da luz. No entanto, as condições de iluminação às quais as plantas foram submetidas foram adequadas para o seu desenvolvimento saudável e permitiram uma comparação viável com os outros dois tratamentos, os quais não apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação ao T5.

Ao analisar T2 e T4, pode-se verificar que os valores expressos foram inferiores aos demais tratamentos. Experimentos realizados por Kobayashi, Amore e Lazaro (2013) analisaram o padrão de desenvolvimento de plantas de alface expostas a tratamentos de luz vermelha, azul e fluorescentes, em que observaram que plantas expostas a luz vermelha possuíram índice SPAD inferior às demais. Neste estudo, os tratamentos T2 e T4 foram afetados negativamente pelas condições de luz, culminando com valores menores em relação a taxa fotossintética. Estes resultados podem estar relacionados com a destruição de moléculas de clorofila, o que influencia negativamente no índice SPAD. A degradação da clorofila por luz tem como resultado a oxidação e abertura do anel tetrapirrólica, com quebra em moléculas pequenas e incolores - o que culmina com redução do SPAD (SUZUKI, TANABE E SHIOI,

1999). De fato, há corroboração entre os dados de clorofilas (tanto CHL_A quanto CHL_T) e de SPAD, visto que os tratamentos de luz branca e luz vermelha são os que possuem os menores valores para estes parâmetros.

5.3 CONCLUSÕES

Com base neste estudo, podemos concluir que as condições de iluminação exerceram um impacto significativo nos parâmetros fisiológicos e bioquímicos avaliados. A eficiência quântica do fotossistema II (MINIPAM) mostrou-se mais elevada em plantas expostas à luz azul e luz natural, enquanto o índice SPAD alcançou valores superiores nas condições de luz azul, azul + vermelha e luz natural. Não observamos diferenças na produção de clorofila b, porém os teores de clorofila a, clorofila total e carotenoides foram mais elevados em plantas submetidas à iluminação azul e azul + vermelha por meio de LEDs. A produção de açúcares reduziu apenas quando as plantas foram expostas à luz branca. Esses resultados sugerem que a utilização de iluminação artificial pode ser promissora, visto que as plantas cultivadas em ambientes internos apresentaram valores superiores na maioria dos parâmetros analisados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, C. F. G. **Germinação, bioquímica e crescimento inicial de plântulas de Cereus jamacaru sob diferentes qualidades de luz.** 2019. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca - Al, 2019.
- ARAÚJO, S.A. do C.; DEMINICIS, B.B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 463-472, 2009.
- BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; ÖQUIST, G. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. **Photosynthesis And Production In A Changing Environment**, [S.L.], p. 193-206, 1993.
- BUKHOV, N.G.; DROZDOVA, I.S.; BONDAR, V.V.; MOKRONOSOV, A.T. Blue, red and blue plus red light control of chlorophyll content and CO₂ gas exchange in barley leaves: Quantitative description of the effects of light quality and fluence rate. **Physiol. Plant.** v. 85 p. 632-638, 1992.
- CABRAL, N. N. **Como as qualidades espectrais de luzes leds aplicadas no cultivo in vitro de orquídeas brasileiras influenciam nos parâmetros morfofisiológicos e bioquímicos durante a aclimatização?** 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.
- CAVALCANTE, R. C. **Efeito de diferentes luminárias led na fotossíntese de alface cultivada em ambiente controlado.** 2022. 62 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Olericultura, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Morrinhos - Go, 2022.
- CENTOFANE, A. R. Light quality on the morphoanatomy and physiology of *Campomanesia pubescens* (DC.) O. Berg. Seedlings. **Scientia Horticulturae**. v. 259, 11p., 2020.
- CHEN, X. L.; WANG, L. C.; LI, T.; YANG, Q. C.; GUO, W. Z. Sugar accumulation and growth of lettuce exposed to different lighting modes of red and blue LED light. **Scientific Reports** v. 9, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43498-8>
- CHEN, X. L.; XUE, X. Z.; GUO, W. Z.; WANG, L. C.; QIAO, X. J. 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.
- FALQUETO, A.R.; CASSOL, D.; MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de; OLIVEIRA, A.C. de; BACARIN, M. A. Características da fluorescência da clorofila em cultivares de arroz com ciclo precoce, médio e tardio. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p. 579-581, jul. 2007.
- JOHKAN, M.; SHOJI, K.; GOTO, F.; HASHIDA, S.; YOSHIHARA, T. Blue Light-emitting Diode Light Irradiation of Seedlings Improves Seedling Quality and Growth after Transplanting in Red Leaf Lettuce, **HortScience horts**, v. 45 n. 12, p. 1809-1814, 2010.

KAMI, C.; LORRAIN, S.; HORNITSCHKE, P.; FANKHAUSER, C. Light-regulated plant growth and development. **Current Topics in Developmental Biology**, v.91, p.29–66, 2010.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Guanabara Koogan S.A., 2004.

KOBAYASHI, K.; AMORE, T.; LAZARO, M. Light-Emitting Diodes (LEDs) for Miniature Hydroponic Lettuce. **Optics and Photonics Journal**, v. 3 n. 1, p. 74-77, 2013. doi: 10.4236/opj.2013.31012.

LANDI, M.; ZIVCAK, M.; SYTAR, O.; BRESTIC, M.; ALLAKHVERDIEV, S. I. Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments: A review. **BBABioenergetics**, 148131, 2019.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Editora RiMa, São Carlos. 531p. 2006.

LAZZARINI, L. E. S.; PACHECO, F. V.; SILVA, S. T.; COELHO, A. D.; MEDEIROS, A. P. R.; BERTOLUCCI, S. K. V.; PINTO, J. E. B. P.; SOARES, J. D. R. Uso de diodos emissores de luz (led) na fisiologia de plantas cultivadas – Revisão. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 2, n. 16, p. 137-144, 2017.

LIN, K.-H.; HUANG, M.-Y.; HUANG, W.-D.; HSU, M.-H.; YANG, Z.-W.; YANG, C.-M. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*). **Scientia Horticulturae**, [S.L.], v. 150, p. 86-91, fev. 2013.

LUO, Y.; SHI, H. Direct regulation of phytochrome actions by photoreceptors. **Trends in Plant Science**, v.20, p.7–9, 2018.

MARANI, I. K. H.; ROSA, M.; SILVA, F. B. da; ALVES, N. V. DE S.; OLIVEIRA, N. R. de; CAVALCANTE, W. S. da S. . Avaliação da utilização de diodos emissores de luz (LEDs) sobre as características morfofisiológicas de plantas de *Alternanthera brasiliana* Kuntze. Anais do Congresso de iniciação científica da Universidade de Rio Verde. Rio Verde – GO. 2022. Disponível em: <http://revistas.unirv.edu.br/index.php/cicurv/article/view/220/63>. Acesso em 05/06/2023.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia Vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Viçosa – MG, Editora UFV, 451 p. 2005.

NOGUEIRA, F. T. S.; KLUGE, R. A.; MACEDO, F. da C. O. **Fotomorfogênese - Parte 1**. São Paulo: USP, 2015. 89 slides, color. Disponível em: <https://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=24306>. Acesso em: 12 jun. 2022.

OLIVEIRA, L. E. de M. **Biossíntese de Clorofilas**. Disponível em: <http://www.ledson.ufla.br/fotossintese-em-plantas-superiores/etapa-fotoquimica/estrutura-dos-pigmentos-fotossinteticos/biossintese-das-clorofilas/>. Acesso em: 04 jun. 2023.

PATTARO, M. C. **A influência da luz azul na morfologia de plantas de alface cultivadas sob diferentes qualidades e intensidades de luz**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso

de Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.

REHMAN, M.; ULLAH, S.; BAO, Y.; WANG, B.; PEN, D.; LIU, L. Light-emitting diodes: whether an efficient source of light for indoor plants? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 24743-24752, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0333-3>

SALLA, L.; RODRIGUES, J. C.; MARENOS, R. A. **Teores de clorofila em árvores tropicais determinados com o SPAD-502**. Revista Brasileira de Biociências, Porto Alegre, v. 5, supl. 2, p. 59-161, 2007.

SCHULZE, P. S. C.; BARREIRA, L. A.; PEREIRA, H. G. C.; PERALES, J. A.; VARELA, J.C. Light emitting diodes (LEDs) applied to microalgal production. **Trends in Biotechnology**, v. 32, n. 8, p. 422-430, 2014.

SHIN, Y.-S.; LEE, M.-J.; LEE, E.-S.; AHN, J.-H.; KIM, M.-K.; LEE, J.-E.; DO, H.-W.; CHEUNG, J.-D.; PARK, J.-U.; UM, Y.-G.; PARK, S.-D.; CHAE, J.-H. Effect of light emitting diodes treatment on growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. 'Oak Leaf'. **Journal of life Science**. v. 24, n. 2, p. 148-153, 2014.

SILVA, L. de M. **Manejo da iluminação em cultivo indoor de alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2021. 43 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2021.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W. do; HECKTHEUER, L. H. H. As clorofilas. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 748-755, jun. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782005000300043>.

SUZUKI, Y.; TANABE, K.; SHIOI, Y. Determination of chemical oxidation products of chlorophyll and porphyrin by high-performance liquid chromatography. **Journal of Chromatography A**, v. 839, p. 85-91, 1999.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TANAKA, A; ITO, H.; TANAKA, R.; TANAKA N. T.; YOSHIDA, K.; OKADA, K. Chlorophyll a oxygenase (CAO) is involved in chlorophyll b formation from chlorophyll a. **Plant Biology**, v.95, p. 12719-12723, 1998.

VIEIRA, G. **Gap dynamics in managed Amazonian forest: Structural and ecophysiological aspects**. 1996, 162f. Tese (Doutorado). Pós graduação em Ecologia Tropical, Universidade de Oxford, Grã-Bretanha, 1996.

YOKOYAMA, A. H.; ZUCARELI, C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; RIBEIRO, R. H.; RIZATTO, L.; TONON, C., 2018, Londrina - Pr. **Evolução do índice de área foliar e índice de SPAD na soja influenciada por formas de uso do solo na entressafra e adubação nitrogenada na cultura**. Londrina - PR, 2018. Disponível em: <https://maissoja.com.br/evolucao-do-indice-de-area-foliar-e-indice-de-spad-na-soja->

influenciada-por-formas-de-uso-do-solo-na-entressafra-e-adubacao-nitrogenada-na-cultura/. Acesso em: 31 maio 2023.

ZHANG, X.; HE, D.; NIU, G.; YAN, Z.; SONG, J. Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 11:33-40, 2018.

ZUFFELLATO-RIBAS, K. C. **FOTOMORFOGÊNESE**. Curitiba - PR, 2019. Disponível em: <http://www.gepe.ufpr.br/pdfs/aulas/9%20FOTOMORFOGENESE.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2023.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS:

Com base nos resultados e na análise realizada, é possível estabelecer as seguintes perspectivas:

Considerando que as plantas expostas à luz azul e à combinação de luz azul + vermelha apresentaram melhorias nos parâmetros fisiológicos e bioquímicos, seria interessante investigar a intensidade e a duração ideais, bem como o fotoperíodo, desses comprimentos de onda, a fim de maximizar o desempenho das plantas.

Compreender como diferentes comprimentos de onda afetam o crescimento e a produção de biomassa em cultivos específicos, como no caso da alface neste estudo, pode levar ao desenvolvimento de sistemas de iluminação personalizados para cada cultura, otimizando, assim, a produtividade.

Embora a iluminação artificial tenha demonstrado resultados promissores neste estudo, é importante levar em consideração o consumo energético e a sustentabilidade desses sistemas. Pesquisas futuras podem se concentrar em estratégias para reduzir o consumo de energia e desenvolver tecnologias mais eficientes em termos de uso de recursos.

Além dos parâmetros avaliados neste estudo, existem outros aspectos a serem investigados, como a resposta de diferentes espécies vegetais a diferentes comprimentos de onda e a influência da iluminação artificial na qualidade nutricional das plantas, bem como o comportamento de absorção dos nutrientes isolados em relação ao comprimento de onda.

Maiores insights podem ser obtidos ao analisar o padrão de comportamento ao longo do tempo do consumo de solução nutritiva e água, índice SPAD e eficiência quântica do fotossistema II (MINIPAM). No entanto, essas análises detalhadas não foram apresentadas devido a restrições de tempo. Da mesma forma, a análise multivariada dos dados demonstra ser promissora, mas também não foi realizada devido a limitações temporais.

Essas perspectivas podem direcionar pesquisas futuras, contribuindo para a melhoria do uso da iluminação artificial em cultivos e impulsionando a eficiência e a sustentabilidade da produção agrícola.