



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA



**INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE DIODOS
EMISSORES DE LUZ NO CULTIVO DA ALFACE**

SABRINA CORDEIRO DE LIMA

Campina Grande – Paraíba
Fevereiro de 2018

SABRINA CORDEIRO DE LIMA

**INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE DIODOS
EMISSORES DE LUZ NO CULTIVO DA ALFACE**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal de
Campina Grande para
obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Agrícola

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

ORIENTADORES:

Prof. Dr. JOÃO MIGUEL DE MOARES NETO – UFCG/CTRN/UAEAg

Prof. Dr. JUAREZ PAZ PEDROZA – UFCG/CTRN/UAEAg

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2018

L732i

Lima, Sabrina Cordeiro de.

Influência da radiação eletromagnética de diodos emissores de luz no cultivo da alface / Sabrina Cordeiro de Lima. – Campina Grande, 2019.
60 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. João Miguel de Moraes Neto, Prof. Dr. Juarez Paz Pedroza".

Referências.

1. Alface – Cultivo. 2. Iluminação Artificial. 3. Cultivo Controlado. 4. LED. 5. Espectro de Luz. I. Moraes Neto, João Miguel de. II. Pedroza, Juarez Paz. III. Título.

CDU 635.52(043)



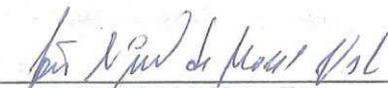
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

SABRINA CORDEIRO DE LIMA

**“INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE DIODOS EMISSORES DE LUZ NO
CULTIVO DA ALFACE”**

APROVADA: 28 de fevereiro de 2018

BANCA EXAMINADORA



Dr. João Miguel de Moraes Neto
Orientador - UAEA/CTRN/UFPG



Dr. Juarez Paz Pedroza
Orientador - UAEA/CTRN/UFPG



Dra. Joelma Sales dos Santos
Examinadora - UATEC/CDSA/UFPG



Dr. Luciano Marcelo Fallé Saboya
Examinador - UAEA/CTRN/UFPG

DEDICATÓRIA

À minha amada e saudosa
Andreza. Por todo o
companheirismo, amor e
admiração que sempre mostrou
ter por mim.

*“...Every step I take
Every move I make
Every single day
Everytime I pray
I'll be missing you...”*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e saúde.

À Universidade Federal de Campina Grande, em particular à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Juarez Paz Pedroza, pela orientação, e confiança em mim depositada.

Ao Professor Luciano Fallé Saboya, pela orientação, auxílio, atenção e valiosas sugestões durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Mozaniel Gomes pelo incentivo, e todo o apoio.

A todos os professores que participaram de forma direta ou indireta da minha formação acadêmica.

A todos os amigos e colegas do Programa de Pós-Graduação e Graduação em Engenharia Agrícola, pelo companheirismo, em especial a Daniele, Tainara, Rafaela, Mariana, Jaílton, Márcia, Bia, Raniza, Juliana.

A José Martínez pelo companheirismo e ajuda fundamental.

Aos amigos Bruno Gaudêncio e Gideilton Dantas, por toda colaboração, disponibilidade e paciência na realização deste trabalho.

E, aos funcionários dos Laboratórios de Engenharia de Irrigação e Drenagem (LEID), de Irrigação e Salinidade (LIS) e de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) pela agradável convivência.

A todos os funcionários da Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFCG, pela atenção dispensada e pela disponibilidade em ajudar.

Enfim, o meu reconhecimento e gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE DIODOS EMISSORES DE LUZ NO CULTIVO DA ALFACE

RESUMO: Os avanços na tecnologia de diodos emissores de luz (LED), tornaram-se uma alternativa viável aos sistemas de iluminação atuais para os requisitos de iluminação em estufas de crescimento de plantas, independentemente das condições ambientais. E compreender como a iluminação de LED específica, no comprimento de onda da faixa espectral entre o azul e vermelho, poderia afetar o desenvolvimento das plantas é, portanto, de grande interesse para a ciência. Diante disto, esta pesquisa objetivou avaliar a influência de lâmpadas LED com diferentes combinações de faixas de luzes azuis e vermelhas no crescimento, produção e fisiologia da alface (*Lactuca sativa*). Utilizou-se um esquema fatorial com 4 combinações de luz de LED (5:1; 3:1; R:B e 6:3) e 2 cultivares de alface (Lisa: Regina e Crespa: Veneranda). As plantas foram transplantadas 30 dias após semeadura (DAS), e cultivadas em vasos num ambiente fechado sob estas condições durante 21 dias, com um fotoperíodo controlado de 12 h. Aos 11 e 21 dias após transplante (DAT), foram determinadas as variáveis, número de folhas (NF) e cobertura foliar (CF), as variáveis relacionadas às trocas gasosas (Pn: Fotossíntese líquida; E: Transpiração; Gs: Condutância estomática; Ci: concentração interna de CO₂; EiUA: eficiência instantânea do uso da água) e o índice de clorofila determinado pelo SPAD. Aos 21 DAT, avaliou-se a área foliar (AF) o diâmetro de caule (DC), o comprimento do caule (CC), a massa fresca/seca das folhas (MFF/MSF), massa fresca/seca do caule (MFC/MSC), massa fresca/seca das raízes (MFR/MSR), e o teor de pigmentos fotossintéticos, clorofila *a*, *b* e carotenoides. O maior crescimento e produção das plantas de alface foram observados na fonte de variação de luz LED com combinação 5:1, bem como, uma maior eficiência na realização de fotossíntese pelas plantas. A cultivar de alface crespa se apresentou superior a lisa em todas as variáveis analisadas, sugerindo adaptação aos tratamentos aplicados.

Palavras-chave: iluminação artificial, cultivo controlado, LED, espectro de luz, *Lactuca Sativa*.

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF LIGHT EMITTING DIODES IN LETTUCE CULTURE

ABSTRACT: Advances in light-emitting diode (LED) technology have become a viable alternative to current lighting systems for lighting requirements in plant growth greenhouses, regardless of environmental conditions. And understand how the specific LED illumination, at the wavelength of the spectral range between blue and red, could affect the development of plants is therefore of great interest to science. The objective of this research was to evaluate the influence of LED lamps with different combinations of blue and red light bands on the growth, production and physiology of lettuce (*Lactuca sativa*). A factorial scheme with 4 combinations of LED light (5: 1; 3: 1; R: B and 6: 3) and 2 lettuce cultivars (Smooth: Regina and Crispy: Veneranda) was used. The plants were transplanted 30 days after sowing (DAS), and grown in pots in a closed environment under these conditions for 21 days, with a controlled photoperiod of 12 h. At 11 and 21 days after transplant (DAT), the variables, number of leaves (NF) and leaf cover (CF), the variables related to gas exchange were determined (Pn: Liquid photosynthesis, E: Transpiration, Gs: Stomatal conductance; Ci: internal CO₂ concentration; EIUA: instantaneous efficiency of water use) and chlorophyll content determined by the SPAD. At 21 DAT, the leaf area (DC), stem length (CC), fresh / dry leaf mass (MFF / MSF), fresh / dry stem mass (MFC) / MSC), fresh / dry mass of the roots (MFR / MSR), and the content of photosynthetic pigments, chlorophyll a, and carotenoids. The highest growth and yield of lettuce plants were observed in the source of 5: 1 combination LED light variation, as well as, a greater efficiency in photosynthesis by plants. The cultivar of crisp lettuce presented superior to smooth in all analyzed variables, suggesting adaptation to the treatments applied.

Keywords: artificial lighting, controlled cultivation, LED, light spectrum, *Lactuca Sativa*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Detalhamento das combinações de luz R/B (vermelho/azul) para cultivo de alface, Campina Grande, PB, 2018.....	21
Figura 2. Detalhamento da disposição dos vasos nas bancadas de cultivo de alface, Campina Grande, PB, 2018.....	22
Figura 3. Detalhamento da instalação de barras de LED para cultivo de alface, Campina Grande, PB, 2018.	23
Figura 4. Temperatura (T) e Umidade Relativa do ar (UR) da estufa de crescimento durante o cultivo de alface sob iluminação LED, Campina Grande, PB, 2018.....	23
Figura 5. Tensiômetro para controle da tensão de água do solo utilizado em cultivo de alface sob iluminação LED, Campina Grande, PB, 2018.	24
Figura 6. Metodologia para quantificação da cobertura foliar (CF) de alface cultivado sob iluminação LED, Campina Grande, PB, 2018.	25
Figura 7. Número de folhas (NF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 (B) dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.....	31
Figura 8. Cobertura foliar (CF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 (B) dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.	32
Figura 9. Área Foliar (AF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 Dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.....	34
Figura 10. Diâmetro do Caule (DC) (A) e Comprimento do Caule (CC) (B) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 Dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.	36
Figura 11. Massa fresca das folhas (MFF) (A) e Massa seca das folhas (MSF) (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	39
Figura 12. Massa fresca do caule (MFC) (A) e Massa seca do caule (MSC) (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	40

Figura 13. Massa fresca das raízes (MFR) (A) e Massa seca das raízes (MSR) (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	41
Figura 14. Fotossíntese Líquida (P_n) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 DAT (B), Campina Grande, PB, 2018.....	46
Figura 15. Concentração interna de CO_2 (C_i) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 DAT (B), Campina Grande, PB, 2018.....	47
Figura 16. Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 DAT (B), Campina Grande, PB, 2018.....	48
Figura 17. Teor de Clorofila <i>a</i> (A) e clorofila <i>b</i> (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2019.....	52
Figura 18. Teor de Carotenoides das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização física do solo utilizado no cultivo da alface, Campina Grande, PB, 2018.....	23
Tabela 2. Resumo da análise de variância para os dados de Número de Folhas (NF), Cobertura Foliar (CF), Área Foliar (AF), Diâmetro do Caule (DC) e Comprimento do Caule (CC) da planta de alface aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	29
Tabela 3. Número de Folhas (NF) e Cobertura Foliar (CF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	30
Tabela 4. Área Foliar (AF), Diâmetro do Caule (DC) e Comprimento do Caule (CC) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.	34
Tabela 5. Resumo da análise de variância para os dados de Massa Fresca e Seca das Folhas (MFF e MSF), Massa Fresca e Seca do Caule (MFC e MSC), Massa Fresca e Seca das Raízes (MFR e MSR) da planta de alface aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.	37
Tabela 6. Massa fresca e seca das folhas (MFF e MSF), Massa fresca e seca do caule (MFC e MSC), Massa fresca e seca das raízes (MFR e MSR) (g planta^{-1}) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018. .	38
Tabela 7. Resumo da análise de variância das variáveis relacionadas às trocas gasosas Fotossíntese Líquida (P_n), Condutância Estomática (G_s), Concentração Interna de CO_2 (C_i) e Eficiência instantânea do uso da água (E_{iUA}) da alface, Campina Grande, PB, 2018.	43
Tabela 8. Fotossíntese Líquida (P_n), Condutância estomática (G_s), Concentração interna de CO_2 (C_i), Transpiração (E) e Eficiência instantânea do uso da água (E_{iUA}) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.....	44

Tabela 9. Resumo da análise de variância para os dados de Clorofila a, b e carotenoides da planta de alface aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018. 50

Tabela 10. Clorofila a, Clorofila b e Carotenoides da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018. 50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. Diodos Emissores de Luz e sua relação com a agricultura.....	16
2.2. Iluminação LED nas estufas de produção hortícola.....	18
2.3. Cultivo de Alface utilizando iluminação LED.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1. Análises de Crescimento	25
3.2. Análises de Produção	26
3.3. Análises Fisiológicas.....	26
3.4. Análise Estatística.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Crescimento da alface cultivada sob iluminação LED	28
4.2. Produção da alface cultivada sob iluminação LED	36
4.3. Fisiologia da alface cultivada sob iluminação LED	42
5. CONCLUSÕES.....	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

A produção agrícola é altamente dependente das condições climáticas e as estufas tecnológicas de produção, também conhecidas como fábrica de plantas, fornecem um ambiente controlado que assegura uma produção estável ao longo do ano, sem sofrer influência do clima. Este tipo de produção apresenta um grande número de vantagens, como a liberdade de produção em qualquer lugar e o isolamento do ambiente externo (IJAZ et al., 2012). A iluminação combinada ao controle ambiental promovido em estufas fornecem, portanto, as condições ideais para cultivo, já que desenvolvimento e a fisiologia das plantas são fortemente influenciados pelo espectro de luz fornecido (WANG et al., 2015).

A utilização de iluminação artificial promovida pelos diodos emissores de luz (LEDs), representam uma tecnologia promissora para a indústria de estufas, uma vez que, possui vantagens técnicas em relação às fontes de iluminação tradicionais. Os LEDs têm a capacidade de controlar a composição espectral e personalizar os fluxos de luz, favorecendo sua aplicação em estudos dessa natureza, pois os efeitos dos comprimentos de onda da luz na fotossíntese das plantas são diferentes (BOURGET, 2008). Quando usados como única fonte para realização de fotossíntese, os LEDs devem ser mensurados e combinados cuidadosamente para obter as respostas desejadas das plantas (MITCHELL, 2012).

Em alguns países onde os fatores limitantes são a área e o clima, o uso de tecnologias de iluminação dentro de estufas agrícolas já é bastante difundido, mas é necessário adquirir mais conhecimentos sobre os seus efeitos para aplicações industriais de grande escala, a exemplo do que vem ocorrendo na China e Holanda (SHEN et al., 2017; STOKKOM et al., 2017). No Brasil, pesquisas sobre a aplicação de iluminação de LED em estufas de produção agrícola ainda são escassas, estudos como os de Pinheiro (2016), são pioneiros e obtiveram resultados que viabilizam o uso dessa tecnologia.

As questões referentes a como e quais espectros específicos e densidades de fluxo fotossintético são exigidos por diferentes espécies de plantas e variedades, em diferentes estágios de ontogênese, quais combinações de

comprimento de onda devem ser selecionadas buscando a máxima produtividade e qualidade de nutrição ideal, ainda estão abertas (OLLE e VIRŠILE, 2013). Tais reflexões são de importância prática para a questão da iluminação, pois a viabilidade de adaptar espectros de iluminação permite controlar o crescimento, o desenvolvimento e a qualidade das plantas.

A inserção da cultura da alface neste meio tecnológico dar-se em virtude do seu alto consumo, no Brasil, 4,8% da quantidade (gramas) de hortaliças adquiridas para consumo domiciliar é de alface (CANELLA et al., 2018). Atraindo assim, os pesquisadores para a aplicação de tecnologias capazes de otimizar a produção, e nesse sentido, a iluminação LED pode ser aplicável para este fim. Entretanto, a relação Vermelho/Azul (R/B) precisa ser melhor estudada, poucos estudos têm sido relatados sobre os efeitos de diferentes combinações R/B no desenvolvimento e fotossíntese da alface (WANG et al., 2016). Além disso, os altos custos de implantação ainda são limitantes para a expansão desta tecnologia, o que torna necessária à adoção de um método alternativo e simplificado para ser aplicado em ambientes de produção de culturas agrícolas.

Diante da atualidade e relevância desta temática, objetivou-se com esta pesquisa, avaliar o efeito da iluminação de barras de LED disponíveis no mercado em diferentes combinações do espectro de luminescência no cultivo de duas cultivares de Alface.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Diodos Emissores de Luz e sua relação com a agricultura

No processo fotossintético as plantas captam energia luminosa convertendo-a em energia química para transformar a água e o dióxido de carbono em nutrientes primários necessários ao seu metabolismo (YEH e CHUNG, 2009). As plantas possuem fotorreceptores para diferentes regiões do espectro luminoso, pois comprimentos de onda específicos induzem respostas específicas. A luz é absorvida por pigmentos foliares, como clorofilas, carotenoides e outros complexos de proteínas (COCETTA et al., 2017).

O espectro de luz que a planta necessita para realizar fotossíntese está em uma faixa de cerca de 400 a 720 nm (XU et al., 2016), que compreende a faixa espectral de luz azul (400-520 nm) e vermelha (610-720 nm).

A luz Vermelha (R) afeta a morfogênese das plantas ao induzir transformações no fitocromo e também é crucial para o desenvolvimento do aparelho fotossintético, assim como, para a regulação da síntese de fitoquímicos (CHOI et al., 2015). Já a luz Azul (B) é importante para desenvolvimento de cloroplasto, abertura estomática e fotomorfogênese, bem como para a regulação da biossíntese de clorofila e antocianina (LI e KUBOTA, 2009).

A luz de LED é a primeira fonte de luz a ter a capacidade de verdadeiro controle espectral, permitindo que os comprimentos de onda sejam adaptados aos fotorreceptores das plantas para fornecer uma produção ótima e influenciar a sua morfologia e composição (MORROW, 2008). Estima-se que a absorção pelas plantas da luz azul e vermelha, emitidas por lâmpadas LED, gira em torno de 90% da luz emitida, e indica que o desenvolvimento das plantas e a sua fisiologia é fortemente influenciado por essas cores e comprimentos de onda específicos (LAZZARINI et al., 2017).

Os diodos emissores de luz (LEDs) têm um enorme potencial como sistemas de iluminação suplementares ou de fonte única para a produção de culturas (MASSA et al., 2008), mas a qualidade da luz deve satisfazer os requisitos para a realização da fotossíntese e fotomorfogênese para o crescimento das plantas.

As lâmpadas de LEDs têm uma longa vida útil, junto com economia de energia e funcionalidade, além de sua segurança para usuário e para o meio ambiente (OLLE e VIRŠILE, 2013). Em comparação com as fontes de luz convencionais, estes sistemas de iluminação possuem várias vantagens únicas, além da capacidade de controlar a composição espectral, inclui-se massa e volume reduzidos, durabilidade, superfícies emissoras relativamente frescas, aquecimento mínimo e saída de fótons que são lineares com a corrente de entrada elétrica (LIN et al., 2013).

Os sistemas LED podem ser configurados para emitir fluxos de luz muito altos, mas mesmo nas altas intensidades de luz, as unidades LED podem ser colocadas perto das plantas, já que não emitem calor radiante (MORROW, 2008). Os LEDs também são facilmente integrados ao controle digital de sistemas que facilitam o programa de iluminação com intensidade variável ou composição espectral ao longo de um curso de fotoperíodo ou com estágio de desenvolvimento da planta (YEH e CHUNG, 2009).

A eficiência do LED, em geral, é projetada para aumentar consideravelmente, tanto como eficiência elétrica quanto como eficácia de fluxo de fótons, segundo Pinho et al. (2011) está previsto que a eficiência fotossintética dos LEDs será o dobro da lâmpada HPS até o ano 2020. E é notório que a tecnologia de iluminação LED em estufas hortícolas está evoluindo em um ritmo rápido. Por exemplo, os LEDs azuis que eram apenas 11% eficientes em 2006 foram relatados como sendo eficientes em conversão elétrica de 49% energia em 2011 (MITCHELL et al., 2012).

Os avanços na tecnologia de iluminação são de grande interesse, os diodos emissores de luz (LEDs) são a tecnologia de iluminação com um grande potencial para melhorar o desempenho e reduzir o custo total da iluminação ambiental controlada (BOURGET, 2008). Em contrapartida o alto custo de capital na implantação ainda é um aspecto importante que atrasa a absorção da tecnologia LED na iluminação hortícola. Apesar disso, espera-se que o desenvolvimento tecnológico dos LEDs reduza os custos de capital e de operação no futuro (MASSA et al., 2008; MORROW, 2008; YEH e CHUNG 2009).

2.2. Iluminação LED nas estufas de produção hortícola

Pesquisas iniciais para aplicações de iluminação LED foram realizadas desenvolvendo sistemas de crescimento de plantas no espaço (BARTA et al., 1992; MASSA et al., 2008) e estes primeiros trabalhos foram um estímulo para o desenvolvimento de iluminação baseada em iluminação de LED para experimentação de fisiologia vegetal.

A maioria desses estudos foi realizada em câmaras de crescimento com ambiente controlado, onde os principais parâmetros ambientais, como temperatura, umidade e concentração de CO₂ podem ser controlados independentemente de influências externas (OLLE e VIRSILE, 2013).

Num ambiente controlado, a maior fotossíntese líquida pode ser obtida em intervalos específicos de temperaturas e intensidades de luz que dependem da espécie, uma temperatura elevada durante a noite reduz o crescimento da planta, a concentração de CO₂ diminui e torna-se um fator limitante de crescimento, valores baixos de umidade relativa aumentam a transpiração, enquanto valores muito elevados reduzem a fotossíntese, além do que, diferentes espécies têm diferentes espectros de absorção (COCETTA et al., 2017).

A aplicação da tecnologia LED foi otimizada para uma ampla gama de culturas hortícolas para controle do fotoperíodo, alteração da morfologia da planta e melhoria da fotossíntese (WALLACE e BOTH, 2016).

Hernández e Kubota (2014) propõem que uma redução da luz na faixa espectral do azul (B) poderia aumentar a área foliar das plantas, e promover a interceptação de luz e acumulação de biomassa.

No estudo de Wang et al. (2009) a luz R (vermelha) ou B (azul) monocromática não conseguiu atender às exigências do crescimento da planta de pepino. Enquanto que, a iluminação interativa de LEDs vermelho/ azul (R/B) comportou-se positivamente sobre as características fotosintéticas de folhas de pepino, ocorreu maior massa foliar por área, mas não teve efeito na produção total de biomassa ou fruta (TROUWBORST et al., 2010). No entanto, Hao et al. (2012) revelou que o uso do sistema inter-iluminação, a qualidade visual dos frutos do pepino melhorou, mas o rendimento das frutas foi aumentado apenas no

período de produção inicial e diminuiu gradualmente em direção à produção tardia período.

Em alguns estudos, foram expostas que a relação R/B ideal para acumulação de peso fresco e seco em plantações de morangos, e de mudas de pepino foram 7/3 (NHUT et al., 2003), e 9/1 (HERNÁNDEZ; KUBOTA, 2016), respectivamente.

Com relação à fotossíntese, muito do que se sabe sobre sua realização conduzida por LEDs vêm de estudos de troca de gás foliar (KIM et al., 2004; HOGEWONING et al., 2010). Os dados de troca de gasosas, fornecem um meio não destrutivo, de estimar padrões de crescimento diários de toda a planta quando submetidos a diferentes condições de luz, CO₂ e temperatura (LEONARDOS et al., 2014).

2.3. Cultivo de Alface utilizando iluminação LED

Para aplicar os resultados à qualidade e à produção de alface, é importante investigar os efeitos da iluminação com LEDs quando fornecidos como única fonte de luz. Existem duas bandas de absorção intensas nas folhas da alface, e estão na faixa de 400-800 nm, principalmente a partir de absorções de clorofila e carotenoides (FANKHAUSER e CHORY, 1997).

Lin et al. (2013) afirmou que os LEDs vermelhos, azuis e brancos misturados com picos de saída em regiões azuis e vermelhas com energia espectral ampla suplementar de 500-600 nm resultaram em muitos efeitos progressivos na aparência, crescimento, desenvolvimento, nutrição e qualidade comestível das plantas de alface.

Johkan et al. (2012), comprovou que o uso de LEDs azuis (440-476 nm), usados sozinhos ou em combinação com LEDs vermelhos, estimularam o acúmulo de biomassa em alface. E a adição de Azul (B), sob Vermelho (R) provoca aumento de peso seco, e no número de folhas da alface (WOJCIECHOWSKA et al., 2015).

Goins et al. (2001) avaliou os efeitos de diferentes comprimentos de onda de luzes LED 660, 670, 680, 690 nm no crescimento e fotossíntese de plantas de

alface. Os resultados mostraram que o rendimento da biomassa aumentou quando o comprimento de onda do LED vermelho aumentou de 660 para 690 nm.

Para analisar o crescimento e os compostos bioativos da alface em resposta à luz de LED (Far-Red) suplementada com uma combinação de luz LED vermelha (R) e azul (B) Lee et al. (2016) atestaram que esta suplementação melhora o crescimento das raízes da alface em comparação com as plantas sob B + R apenas.

No estudo de Chen et al. (2016) foram investigados os efeitos das qualidades de luz suplementar sobre o crescimento e as propriedades nutricionais das plantas de alface (Var. Crispa). Os resultados indicaram que as luzes suplementares levaram a mudanças morfológicas, as plantas com luz branca pareciam compactas e vigorosas, enquanto as com luz vermelha suplementar pareciam plantas escassas e torcidas, já para a luz azul suplementar foram detectadas folhas maiores.

A relação R: B ideal de LEDs vermelhos e azuis é diferente com as espécies de plantas, por exemplo, a relação R: B ideal para acumulação de biomassa em alface foi relatada como 12 (WANG et al., 2016).

Pinho et al. (2016) investigou a influência de diferentes espectros de luz no crescimento, produção e nutrição de alface. Em geral, todos os parâmetros avaliados (largura das folhas, índice de área foliar (LAI), peso fresco, índice SPAD, peso fresco e peso seco), exceto o comprimento e número de folhas foram afetados pela qualidade do espectro de luz. O crescimento mais rápido pode ter sido a causa da diminuição do índice SPAD e peso seco em 27 e 7%, respectivamente.

Quanto aos pigmentos fotossintéticos, estima-se uma razão maior de Chl *a/b* e carotenoides em mudas de alface tratadas com LED (B), ou seja, as luzes teriam uma vantagem na absorção de luz e podem, portanto, melhorar a fotossíntese após o transplante (JOHKAN et al., 2010).

Um outro ponto importante é a característica das cultivares, que determinam o seu comportamento em relação à luz, os resultados obtidos por Ouzounis et al. (2015) indicam que as respostas da alface à luz são dependentes da cultivar utilizada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA) do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Utilizou-se uma estrutura vertical composta por quatro prateleiras de alvenaria em ambiente livre de influências externas. Os tratamentos foram as variações da iluminação de LED, com função RGB para iluminação hortícola, em diferentes combinações de Vermelho (R) e Azul (B), na composição de quatro variações das barras de LED (R:B). LED 100% vermelha e 100% azul alternadas (LED R:B), 3:1, 5:1 e 6:3 (Figura 1, nesta ordem), comercialmente disponíveis, no cultivo de duas cultivares de alface, uma lisa (Regina) e outra crespa (Veneranda).

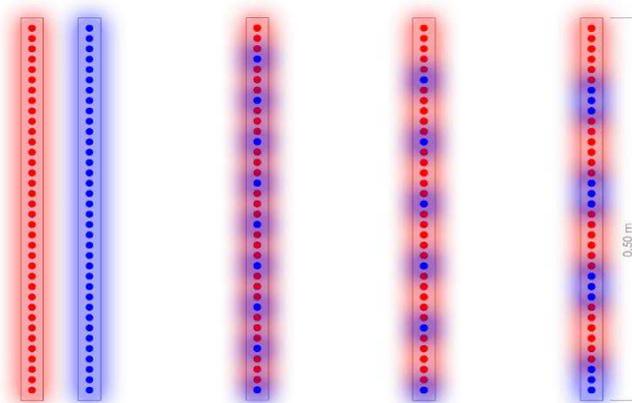


Figura 1. Detalhamento das combinações de luz R/B (vermelho/azul) para cultivo de alface, Campina Grande, PB, 2018.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com seis repetições, sendo os tratamentos arranjados em esquema fatorial (4x2). Os fatores estudados foram 4 variações de Luz de LED em proporção (5:1, 3:1, 6:3 e R:B) e 2 cultivares de alface (Lisa e Crespa), totalizando 48 unidades experimentais. A unidade experimental foi constituída de uma planta por vaso, espaçadas em 30x25 cm (Figura 2). Todos os tratamentos mantiveram um

fotoperíodo de 12 h. As plantas foram colhidas aos 21 dias após transplante (DAT).

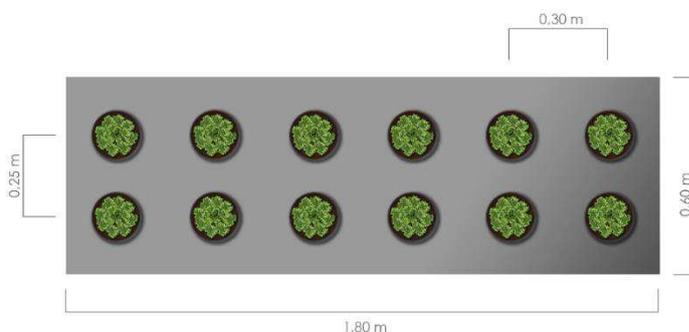


Figura 2. Detalhamento da disposição dos vasos nas bancadas de cultivo de alface, Campina Grande, PB, 2018.

Os LEDs RGB obtinham saídas de pico nas regiões do vermelho e azul com energia espectral ampla suplementar a 445 nm da região do azul e 660 nm na região do vermelho.

Cada barra de LED tinha 50 cm, composta por 36 lâmpadas com uma potência de saída de 10 W. As barras foram conectadas e ligadas a uma fonte de 12 v e 5 A, para cada prateleira. Elas foram instaladas na parte superior das prateleiras, 30 cm acima das plantas, espaçadas em 15 cm, totalizando 10 barras por prateleira (Figura 3). A Figura 3, logo abaixo, exemplifica a instalação do tratamento R:B, de maneira análoga ocorreu a instalação dos demais tratamentos.

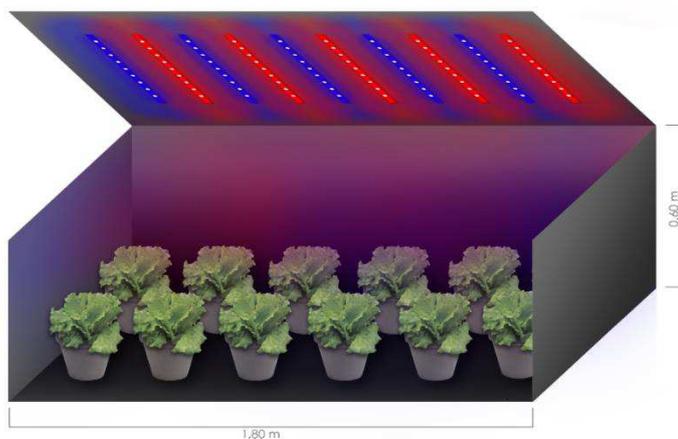


Figura 3. Detalhamento da instalação de barras de LED para cultivo de alface, Campina Grande, PB, 2018.

Para regular o fotoperíodo as barras de LED, foram conectadas a um timer digital programável. A atmosfera da unidade não foi enriquecida em CO₂ durante esta experiência.

No ambiente interno instalou-se um termohigrômetro, para caracterização ambiental da unidade de produção (Figura 4).

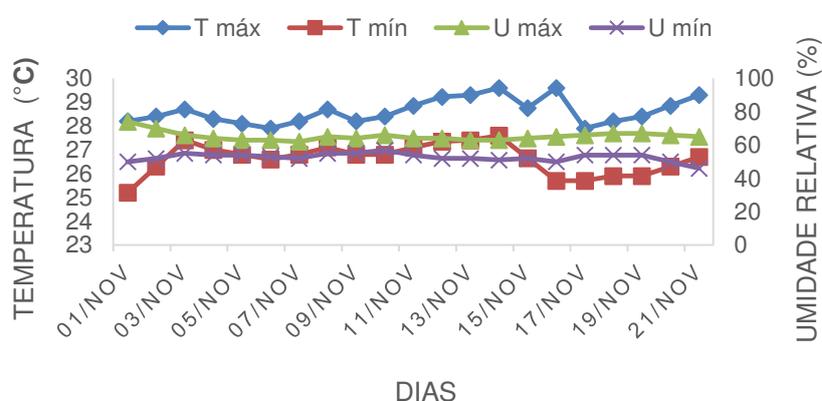


Figura 4. Temperatura (T) e Umidade Relativa do ar (UR) da estufa de crescimento durante o cultivo de alface sob iluminação LED, Campina Grande, PB, 2018.

As mudas das cultivares de alface lisa (Regina) e crespa (Veneranda) utilizadas foram fornecidas por produtor do município de Lagoa Seca - PB. Elas então foram semeadas em espuma fenólica e coletadas para transplante com 30 dias após semeadura (DAS). Sendo transplantadas para vasos plásticos de 4,8 litros, compostos por uma camada de brita e tela abaixo da camada de solo para facilitar a drenagem. Os vasos foram completados com cerca de 5 kg de solo, cujas características físicas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física do solo utilizado no cultivo da alface, Campina Grande, PB, 2018.

Características Físicas	Areia	Silte	Argila
Granulometria (%)	72,88	9,03	18,09
Classificação Textural	Solo Franco Arenoso		

Utilizou-se adubação química (NPK), seguindo metodologia proposta por Novais et al. (1991) para adubação básica de solo, onde a fonte de nitrogênio foi o nitrato de cálcio (15,5% de Ca (NO₃)₂), a fonte de fósforo o ortofosfato simples (18% de P₂O₅) e de potássio, o cloreto de potássio (60% de K). O solo foi adubado antes de ser transferido para os vasos.

Para confecção da curva retenção de água no solo utilizou-se o Software SWRC Fit, tomando como parâmetro a equação de Van Genuchten (Equação 1).

$$\theta = \theta_{sat} + \frac{(\theta_{sat} - \theta_r)}{(1 + (\alpha h)^{n'})^m} \quad (1)$$

Em que, θ_{sat} é a umidade volumétrica saturada; θ_r é a umidade volumétrica residual, h é carga de pressão. E α , n' e m são parâmetros da equação.

Para o manejo da irrigação, foram instalados ao acaso 4 tensiômetros de punção a 15 cm de profundidade (Figura 5), um em cada prateleira de tratamento de Luz. Com tensímetro digital foram aferidas diariamente a tensão de água no solo. A umidade crítica tomada como parâmetro para determinar quando irrigar foi de 15 kPa (MAROUELLI, 2008).



Figura 5. Tensiômetro para controle da tensão de água do solo utilizado em cultivo de alface sob iluminação LED, Campina Grande, PB, 2018.

Para o recebimento das plantas de alface, o solo foi colocado em seu estado de capacidade de campo, aplicou-se uma lâmina de água de 33 mm, por

ocasião do transplântio, e também foi realizada a reposição quando acusada a tensão crítica estabelecida.

O experimento foi conduzido durante 21 dias, no período de 01/11 a 22/11 do ano de 2017, sendo realizadas duas avaliações, uma aos 11 DAT e outra ao final do experimento, 21 DAT. Em que, determinou-se variáveis relativas ao crescimento, produção e fisiologia das plantas, descritas a seguir.

3.1. Análises de Crescimento

Aos 11 e 21 DAT foi determinado o número de folhas (NF), através da contagem das folhas de cada planta, e a cobertura foliar (CF), onde, cada unidade experimental foi fotografada com câmera digital, numa superfície de contraste tomando como parâmetro uma área de referência de 36 cm² (Figura 6). O número de pixels correspondentes à área de referência foi correlacionado com o número de pixels correspondentes a área de verde (coberta pelas folhas) e assim, determinada a cobertura foliar de cada planta, utilizando um programa de edição de imagens (Adobe Photoshop versão 2017).

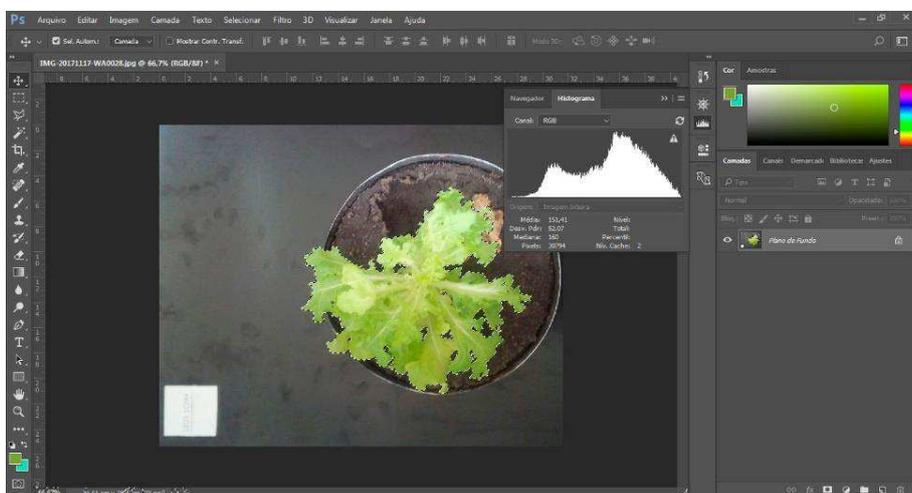


Figura 6. Metodologia para quantificação da cobertura foliar (CF) de alface cultivado sob iluminação LED, Campina Grande, PB, 2018.

O Comprimento e Diâmetro do Caule (CC e DC, respectivamente) foram mensurados com paquímetro digital, apenas aos 21 DAT, através de uma análise destrutiva, assim como a área foliar (AF). Na determinação da AF foi utilizado o

método de Benincasa (1986), onde uma amostra com área conhecida de 9 cm² foi retirada da folha e encaminhada para estufa afim de se obter a massa seca da amostra. Posteriormente, a área foliar total de cada planta foi encontrada pela razão entre o produto da área da amostra e a massa seca total das folhas, pela massa seca da amostra (Equação 2).

$$AFT = \frac{\text{área da amostra} \cdot \text{massa seca total}}{\text{massa seca da amostra}} \quad (2)$$

3.2. Análises de Produção

Para determinar a massa da matéria fresca e seca das plantas (g), as folhas, caules e raízes foram separadas. A massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do caule (MFC) e massa fresca da raiz (MFR) foram determinadas pelo método direto da pesagem em balança de precisão. O material fresco foi armazenado em sacos de papel com identificação e passaram pelo processo de secagem em estufa com circulação de ar forçado a 65°C, por 48 horas, após esse procedimento, foi feita a pesagem da massa final para se obter a massa da matéria seca. As pesagens foram realizadas em balança analítica de precisão 0,0001g, aos 21 DAT.

3.3. Análises Fisiológicas

As medições de trocas gasosas foram realizadas aos 11 e 21 dias após transplântio (DAT). As variáveis foram mensuradas com o uso do equipamento analisador de trocas gasosas modelo LCpro+, contendo um IRGA (Infra Red Gas Analyser). O equipamento realizou a leitura das seguintes variáveis: fotossíntese líquida (Pn) ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (Gs) ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO₂ (Ci) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e eficiência instantânea no uso da água (EiUA - Pn/E) calculada relacionando à fotossíntese líquida com a transpiração [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) / (\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})$].

Para o procedimento de determinações dos teores de clorofila em laboratório ao fim do experimento (21 DAT), foram retirados discos foliares com diâmetro de 0,771mm da lâmina foliar por meio de um furador, entre a borda e a

nervura central da folha. Os teores de clorofilas a e b total e os carotenoides, foram quantificados por meio da extração dos pigmentos das amostras retiradas das folhas frescas que, após pesadas, foram trituradas em placas de petri em ambiente com mínima luminosidade, e colocadas em recipientes contendo 6 mL de acetona 80%, mantendo-as no escuro e sob refrigeração durante 72 horas; em seguida, coletou-se os sobrenadantes contendo os pigmentos extraídos e se procedeu as leituras de absorbâncias.

Para a leitura foi utilizado o equipamento espectrofotômetro da marca Spectrum SP-2000UV, nos comprimentos de onda a 470, 647 e 663 nanômetros, utilizando acetona 80% como branco. As determinações dos níveis das clorofilas e carotenoides foram realizadas pelo método descrito por Lichtenthaler (1987).

3.4. Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância utilizando o software estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014). Os efeitos das diferentes variações nas combinações da iluminação e das cultivares, foram comparados pelo teste de Tukey ao nível de 1 e 5% de probabilidade ($p < 0,01$; $p < 0,05$). Na ocorrência de interação entre os fatores desdobraram-se os efeitos dos tratamentos de luz em função das cultivares.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Crescimento da alface cultivada sob iluminação LED

O resumo da análise de variância para o Número de Folhas (NF) e Cobertura Foliar (CF) aos 11 e 21 DAT, e para a Área Foliar (AF), Diâmetro de Caule (DC) e Comprimento do Caule (CC) aos 21 DAT da alface cultivada sob iluminação LED está apresentado na Tabela 2.

Constatou-se efeito significativo da iluminação pelo teste de Tukey nas variáveis de crescimento, NF (aos 11 e 21 DAT), CF (aos 11 e 21 DAT), AF, DC e CC (aos 21 DAT). O tipo de cultivar também influenciou no crescimento das plantas, e a interação entre os fatores foi significativa em todas as variáveis relacionadas ao crescimento da alface.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para os dados de Número de Folhas (NF), Cobertura Foliar (CF), Área Foliar (AF), Diâmetro do Caule (DC) e Comprimento do Caule (CC) da planta de alface aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Fonte de Variação	GL	NF		CF		AF	DC	CC
		Quadrado Médio						
DAT		11	21	11	21		21	
Iluminação (L)	3	128,30**	643,25**	53486,46**	231079,59**	524848,45**	129,88**	346,36**
Cultivar (C)	1	56,33**	147**	395662,82**	216174,72**	331211,31**	5,73**	70,523**
LxC	3	40,66**	88,05**	19676,58*	28758,22**	91235,32**	15,74**	52,659**
Erro	40	3,21	3,17	4844,6	2521,15	18934,29	0,614	2,9
CV (%)		10,15	9	14,11	13,28	24,83	8,5	11,21

GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrados médios; CV: Coeficiente de Variação (transformação $(X+0,5)^{1/2}$; ** Significativo a 1%, significativo a 5% e ^{ns} não significativo pelo teste F de Tukey.

Na Tabela 3 podem ser observados os valores médios das variáveis de crescimento em função dos tratamentos aplicados em cada período avaliado.

Tabela 3. Número de Folhas (NF) e Cobertura Foliar (CF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Número de Folhas (planta ⁻¹)			Cobertura Foliar (cm ² planta ⁻¹)		
Iluminação	11 DAT	21 DAT	Iluminação	11 DAT	21 DAT
LED5:1	11,58c	16,16d	LED5:1	305,65b	307,81c
LED3:1	9,08b	13,25c	LED3:1	261,345b	253,86c
LED6:3	3,75a	0a	LED6:3	151,28a	0a
LEDR:B	8,41b	5,75b	LEDR:B	270,81b	116,66b
Cultivar	11 DAT	21 DAT	Cultivar	11 DAT	21 DAT
Lisa	7,16a	7,04a	Lisa	156,47a	102,47a
Crespa	9,29b	10,54b	Crespa	338,06b	236,69b

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Dentre os tratamentos de luz aplicados, as combinações de LED 5:1 e 3:1 proporcionaram um melhor desenvolvimento das plantas em ambas as cultivares estudadas, apresentando os maiores índices tanto para o NF quanto para a CF.

Para a cultivar de alface lisa, a combinação de iluminação LED 6:3, aos 11 DAT, não possibilitou o crescimento das plantas, resultando na perda de 100% das parcelas experimentais, sugerindo assim, que o tratamento não foi oportuno para a realização de fotossíntese e consequente geração de energia para as plantas. Aos 21 DAT a cultivar de alface crespa também demonstrou a perda de todas as parcelas experimentais. No tratamento de luz LED R:B, ao final do experimento (21 DAT), ocorreu a perda de todas as parcelas da cultivar de alface lisa. Tais resultados podem indicar que a iluminação com as proporções 6:3 e R:B não seriam adequadas para o cultivo de alface.

Resultados contrários foram encontrados em alguns estudos que utilizaram iluminação LED como fonte de energia para as plantas. As pesquisas de Goins et al. (2001), Hogewoning et al. (2010) e Wang et al. (2016), foram convincentes, pois, ocorreu o aumento na biomassa das plantas de alface. Dessa

forma, reforça que a combinação de LEDs vermelhos e azuis, que são frequentemente usados em sistemas de produção de plantas fechadas, exibe uma alta eficiência de produção em comparação com outras fontes de luz, como lâmpadas fluorescentes da mesma intensidade (JOHKAN et al., 2010; SON e OH, 2013).

A interação entre os fatores Iluminação e Cultivar (LxC) para o número de folhas (NF) aos 11 DAT (A) e aos 21 DAT (B) é apresentado na Figura 7.

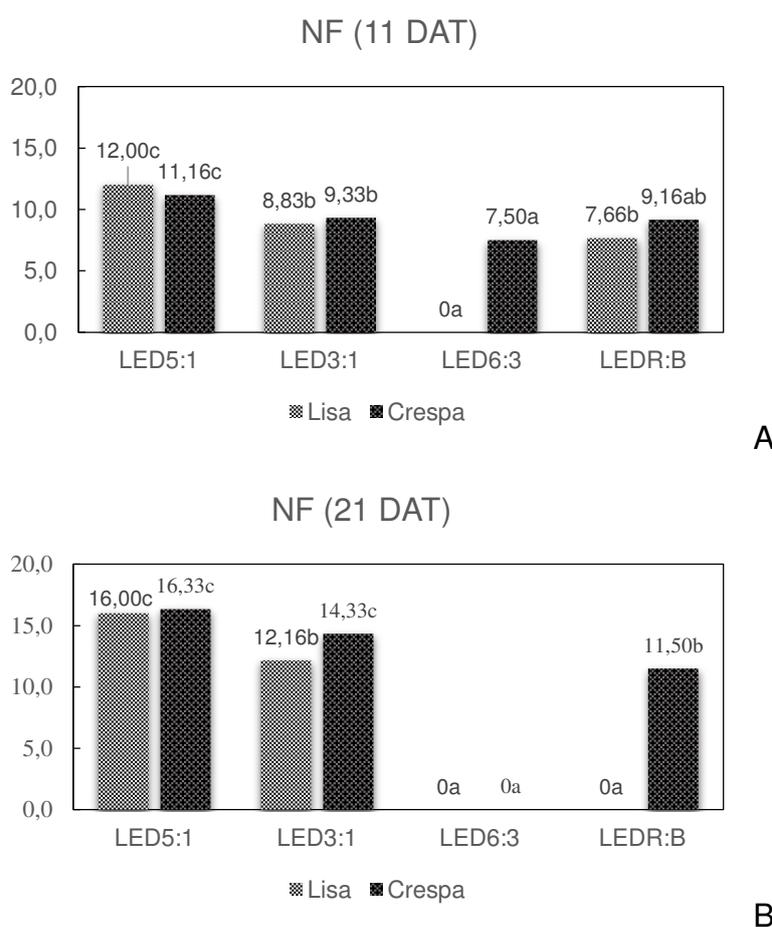


Figura 7. Número de folhas (NF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 (B) dias após transplante (DAT), Campina Grande, PB, 2018.

A utilização de diferentes combinações de luz foi um fator determinante no número de folhas das cultivares de alface. De uma maneira geral, a proporção de LED 5:1 promoveu maior número médio de folhas por planta e a cultivar crespa teve maiores resultados, sugerindo melhores padrões de crescimento sob estas condições de cultivo.

O valor médio do número de folhas variou de 11,5 à 16,33 na cultivar de alface crespa aos 21 DAT, no tratamento de luz (LED 5:1). Lee et al. (2015) obtiveram resultados semelhantes para o número de folhas de alface, variando de 14,9 à 15,6 para os diferentes tratamentos de luz aplicados (90/30, 80/40, 70/50 e 60/60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Em 2010, Lee et al. já haviam relatado que o crescimento das folhas de alface é mais estimulado em luzes vermelha e azul do que sob luz fluorescente com o mesmo fluxo de fótons.

As cultivares de alface mostraram respostas diferentes à cobertura foliar (CF) nas diferentes combinações de luz (Figura 8). A cultivar crespa sob o padrão de luminescência proporcionado pela fonte de luz LED 5:1 aos 11 DAT exibiu uma CF de 380,8 cm^2 e que se manteve superior às demais até os 21 DAT.

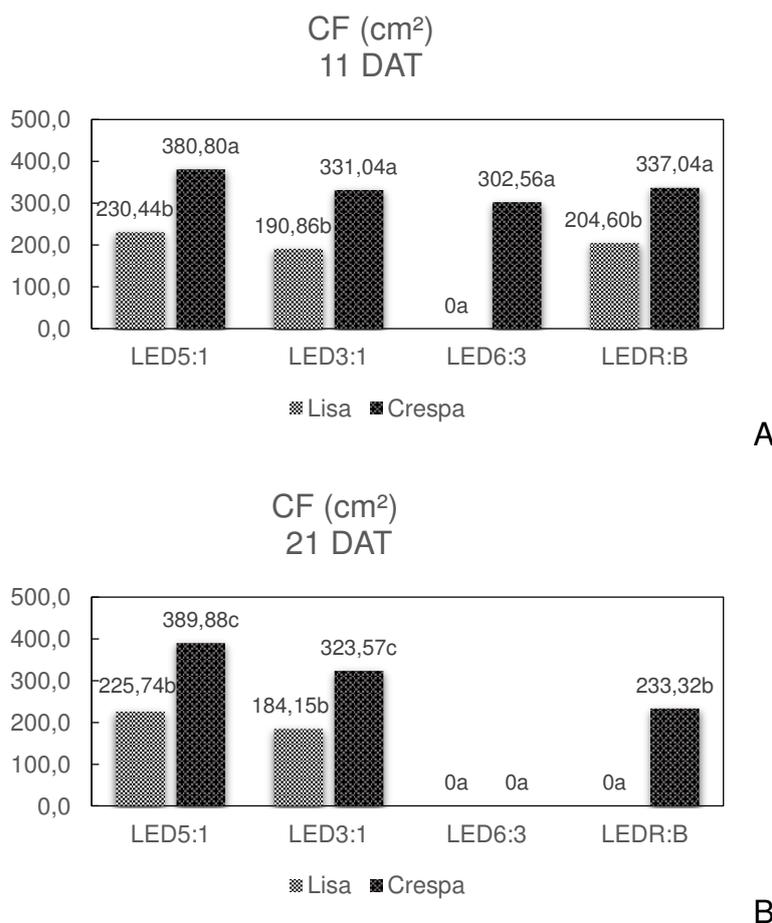


Figura 8. Cobertura foliar (CF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 (B) dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.

Ao final do experimento (21 DAT) a cultivar de alface crespa apresentou um maior índice de cobertura foliar, os resultados mostram uma redução neste índice de 19,84cm² em média para a cultivar de alface lisa e 22,46 cm² para a alface crespa. Como esse índice mede o comportamento das cultivares de uma maneira geral, esta redução se deve à perda de algumas parcelas experimentais, como também a ocorrência do murchamento de algumas plantas (Figura 13).

Dentre os tratamentos de luz pode-se observar que a combinação de LED 5:1 proporcionou aos 21 DAT maior área de cobertura foliar apenas para a cultivar crespa. Enquanto que, ocorreu significativa redução da CF na cultivar lisa em todos os tratamentos de luz.

Miyagi et al. (2017) relataram em seu estudo, que a irradiação de luz azul e vermelha aumentou o crescimento das plantas de alface ao longo de um período de 1 semana. No entanto, numa exposição mais longa, 3 semanas, a luz azul ou vermelha diminuiu o crescimento relativo à luz branca, não sendo possível observar a formação da cabeça de plantas irradiadas com LED, enquanto tal fenômeno foi observado em plantas cultivadas com luz branca. Tais fatos sugerem que em termos de aspectos visuais, as plantas de alface cultivadas com iluminação LED podem ter CF comprometida, o que prejudicaria sua aceitação comercial.

Com relação a área foliar, o diâmetro e comprimento do caule, os resultados seguiram a mesma tendência, ou seja, a cultivar crespa e a combinação de LED 5:1 apresentaram-se com maiores índices (Tabela 4).

Tabela 4. Área Foliar (AF), Diâmetro do Caule (DC) e Comprimento do Caule (CC) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Iluminação	Área Foliar (cm ² planta ⁻¹)	Diâmetro do Caule (mm)	Comprimento do Caule (mm)
LED5:1	480,19c	6,34b	11,28c
LED3:1	367,16c	6,71b	10,57c
LED6:3	0a	0a	0a
LEDR:B	199,57b	2,04b	4,29b
Cultivar	Área Foliar (cm ² planta ⁻¹)	Diâmetro do Caule (mm)	Comprimento do Caule (mm)
Lisa	178,66a	3,43a	5,32a
Crespa	344,80b	4,12b	7,74b

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Na Figura 9 é possível analisar a AF em resposta à interação dos fatores estudados. A área foliar (AF) das plantas promovida pela fonte de variação LED 5:1 foi consideravelmente maior do que a AF os demais tratamentos. A cultivar de alface crespa acabou se sobressaindo a cultivar de alface lisa.

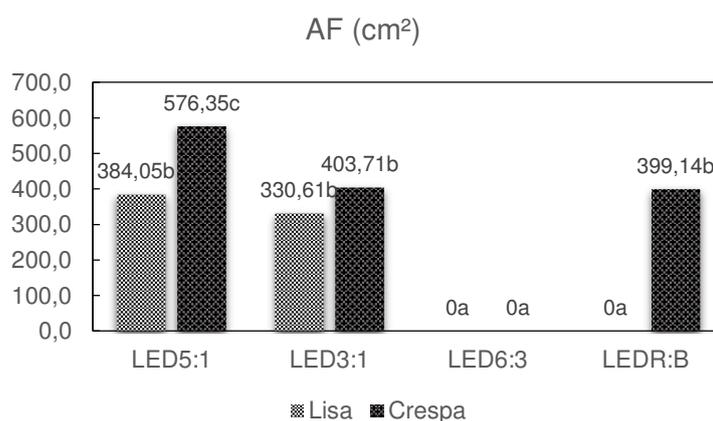


Figura 9. Área Foliar (AF) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 Dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.

Estes resultados demonstram que a cultivar de alface lisa é menos resistente aos espectros de luminescência aplicados. Hernandez e Kubota (2014), alegaram que o excesso de luz azul reduz a área foliar e a interceptação de luz

nas plantas. Fato comprovado neste experimento, já que a fonte de luz LED R:B apresenta maior quantidade de incidência de luz na faixa espectral da luz azul.

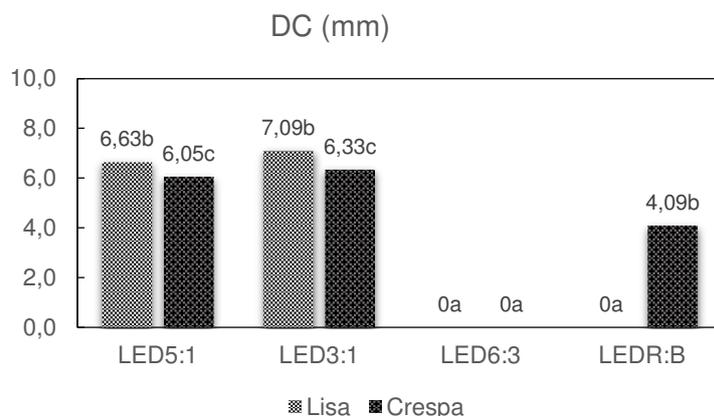
A extensão da folha nas direções vertical e horizontal é controlada por diferentes genes. A luz azul causa um desequilíbrio na expressão desses genes, resultando em inibição da expansão da folha, no entanto, o efeito da dose de B na área foliar depende e varia com a espécie estudada. (TSUKAYA, 1998).

As diferenças na intensidade de luz aplicadas ocasionam variação no crescimento e desenvolvimento da alface. Estudando diferentes regimes de luz LED vermelho + azul (126, 170, 266, 201 e 183 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), Anuar et al. (2016) observaram que a área foliar total da alface não foi afetada por eles, embora o rendimento tenha variado em 16%, o que poderia estar associado as diferenças nas intensidades da irradiância.

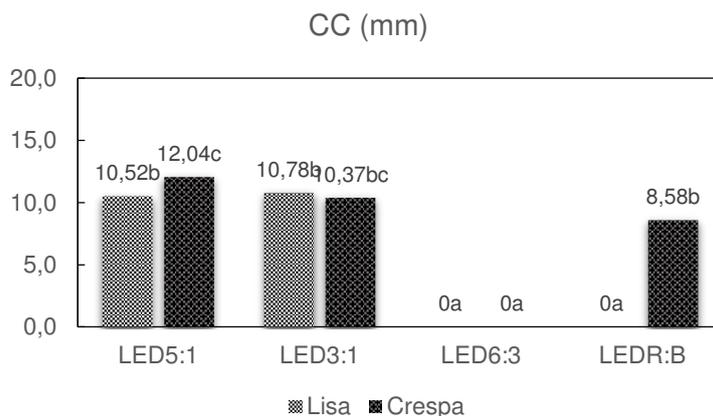
O crescimento das folhas de alface pode ser aumentado pela alta exposição ao CO_2 (MIYAGI et al., 2017), deste modo, a área foliar resultante neste estudo foi afetada pela baixa concentração de dióxido de carbono, já que a atmosfera da estufa não foi enriquecida com CO_2 .

Na Figura 11 encontram-se os resultados da interação entre os fatores iluminação e cultivar aos 21 DAT para as variáveis diâmetro de caule (DC) e comprimento do caule (CC),

O DC do caule apresentou maiores resultados na fonte de LED com combinação 3:1, enquanto que, o maior CC foi para o LED 5:1 (Figura 10).



A



B

Figura 10. Diâmetro do Caule (DC) (A) e Comprimento do Caule (CC) (B) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 Dias após transplântio (DAT), Campina Grande, PB, 2018.

A cultivar de alface crespa exibiu um maior DC e CC o que pode ocasionar o pendoamento das plantas. O pendoamento precoce provoca o alongamento do caule, podendo assim, reduzir o número de folhas, e tornar o sabor da folha amargo, resultando na colheita de plantas ainda pequenas, com menor peso e número de folhas, de má qualidade, não expressando, portanto, o seu máximo potencial genético.

Nos estudos de Zhang et al. (2017), as plantas de alface irradiadas com FLR (Luz fluorescente + LED vermelha) e FLB (Luz fluorescente + LED azul) mostraram-se com maior diâmetro do caule, enquanto que o mais baixo foi observado em plantas B (azul). Aos 50 DAS (dias após sementeira), o diâmetro do caule das plantas tratadas com R foram aumentados em 20% e 54% do que em B e R+B, respectivamente. Estes resultados indicam que as respostas do crescimento das plantas para a qualidade da luz, talvez não sejam apenas relacionados a espécies ou cultivares, mas também ao período de crescimento.

Cope et al. 2014 descobriram que 0,3% de luz azul (B) produziu maior comprimento de caule na alface do que 92% B usando taxas diferentes de R:G:B.

4.2. Produção da alface cultivada sob iluminação LED

O resumo da análise de variância para a Massa Fresca das Folhas (MFF), Massa Fresca do Caule (MFC), Massa Fresca das Raízes (MFR), Massa Seca

das Folhas (MSF), Massa Seca do Caule (MSC) e Massa Seca das Raízes da alface obtidas aos 21 DAT está descrito na Tabela 4.

Constatou-se que tanto a iluminação quanto as cultivares estudadas foram significativas para todas as variáveis relacionadas à produção da alface, exceto a variável massa fresca do caule (MFC). Para a interação também ocorreu efeito relevante (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo da análise de variância para os dados de Massa Fresca e Seca das Folhas (MFF e MSF), Massa Fresca e Seca do Caule (MFC e MSC), Massa Fresca e Seca das Raízes (MFR e MSR) da planta de alface aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

		MFF	MSF	MFC	MSC	MFR	MSR
	GL	QM					
Iluminação (L)	3	333,65**	0,696**	1,509**	0,0048**	140,472110**	0,629**
Cultivar (C)	1	130,61**	0,537**	0,011 ^{ns}	0,0007**	25,121367**	0,088**
L x C	3	66,50**	0,274**	0,208**	0,0024**	36,69436**	0,140**
Erro	40	5,47	0,014	0,017	0,000082	1,183934	0,003181
CV (%)		15,2	6,66	7,45	0,84	11,06	3,36

GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrados médios; CV: Coeficiente de Variação (transformação $(X+0,5)^{1/2}$); ** Significativo a 1%, significativo a 5% e ^{ns} não significativo pelo teste F de Tukey.

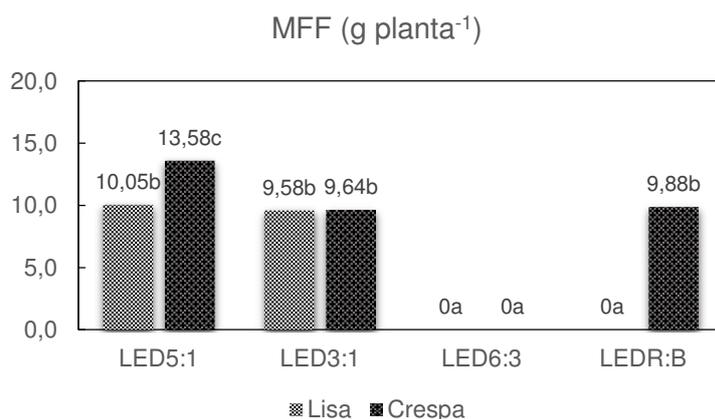
O rendimento das plantas é o resultado da interação de vários fatores ambientais sob os quais estas são cultivadas. Os resultados deste estudo mostraram que na combinação de LED 5:1 ocorreu um maior acúmulo de biomassa e conseqüentemente, fitomassa da alface. Em relação a cultivar, pode-se afirmar que a alface crespa desempenhou um melhor resultado em termos de produção (Tabela 6).

Tabela 6. Massa fresca e seca das folhas (MFF e MSF), Massa fresca e seca do caule (MFC e MSC), Massa fresca e seca das raízes (MFR e MSR) (g planta^{-1}) da alface cultivada sob iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

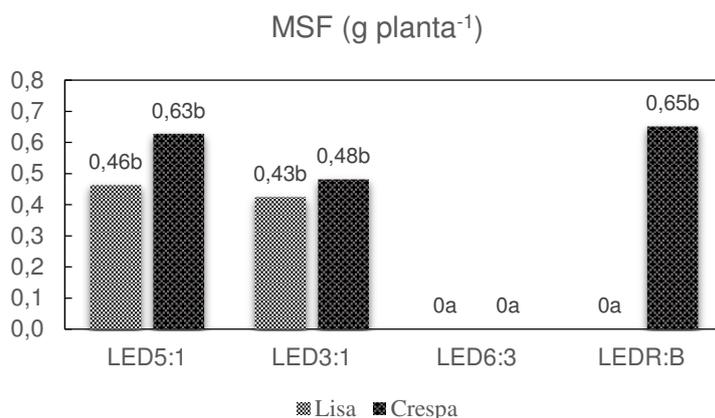
Iluminação	MFF	MSF	MFC	MSC	MFR	MSR
LED5:1	11,81c	0,54c	0,59c	0,042c	7,32c	0,46c
LED3:1	9,74c	0,46c	0,58c	0,043c	6,86c	0,46c
LED6:3	0a	0a	0a	0a	0a	0a
LEDR:B	4,93b	0,32b	0,19b	0,025b	3,32b	0,20b
Cultivar	MFF	MSF	MFC	MSC	MFR	MSR
Lisa	4,97a	0,23a	0,32a	0,023	3,65a	0,25a
Crespa	8,27b	0,44b	0,36a	0,031	5,09b	0,33b

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Como o tratamento de LED 5:1 resultou em uma maior área foliar (Figura 9), subentende-se que maior foi a capacidade de realização de fotossíntese também foi maior, refletindo na produtividade da cultura, e pode ser visualizado através da análise da Figura 11, confirmando um maior rendimento de biomassa das plantas.



A



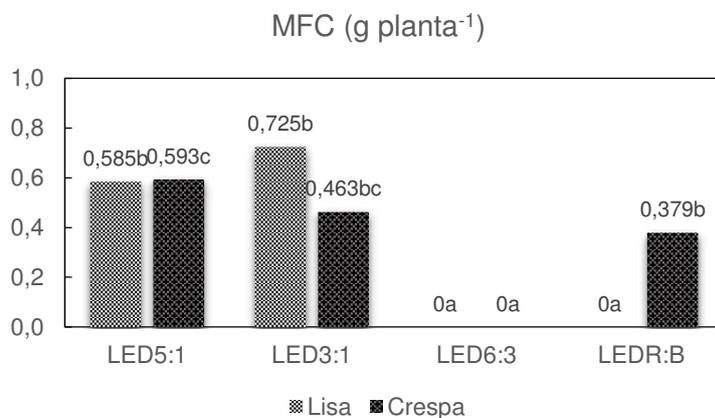
B

Figura 11. Massa fresca das folhas (MFF) (A) e Massa seca das folhas (MSF) (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

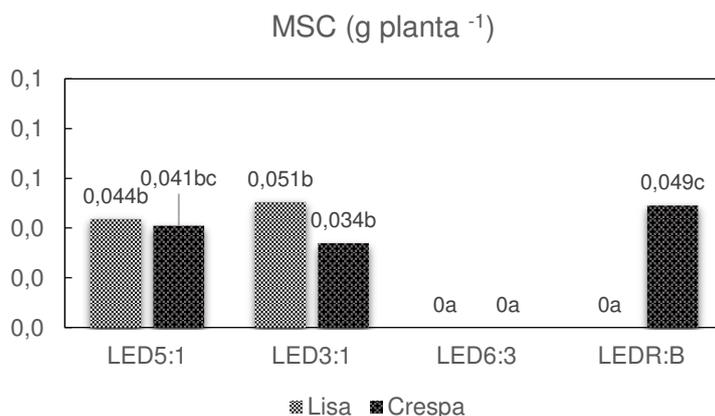
No tratamento de maior produção, e para a cultivar de melhor rendimento, obteve-se cerca de 13,58 g planta⁻¹. Estudando os efeitos de diferentes condições de intensidade de luz sobre o rendimento de plantas de alface cultivadas sob condições ambientais semelhantes, Weiguo et al. (2012) mostraram em seus resultados que a intensidade de luz de LED de 600 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ chegou a uma produção de 162,89 g planta⁻¹, resultados discordantes dos encontrados neste estudo. O que indica que neste experimento, as plantas produzidas estão fora dos padrões, de modo que as reduções na biomassa total da alface sugerem que a qualidade da luz pode alterar o crescimento, diminuir o peso médio da alface, e por isso, diminuir o seu valor de mercado. Esta ocorrência pode ter sido devido ao fato das luzes não terem intensidade suficiente para um rendimento favorável.

Lee et al. (2015), descobriram que uma quantidade ótima de irradiação de LED vermelho e azul pode ser representada por 80/40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, em que o maior peso foliar encontrado neste tratamento foi 47,5 g por planta. Yorio et al. (2001) relataram que houve maior acumulação de peso na alface cultivada sob luz vermelha suplementada com luz azul do que na alface cultivada sob luz vermelha sozinha. Amoozgar et al. (2016), indicaram em seu estudo que a aplicação de lâmpadas LED azul + vermelha aumentou a massa seca de alface em comparação com apenas suplementação azul.

A interação entre a iluminação em função das cultivares para a massa fresca e massa seca do caule (MFC e MSC) está presente na Figura 12.



A



B

Figura 12. Massa fresca do caule (MFC) (A) e Massa seca do caule (MSC) (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Os caules das plantas de alface foram mais robustos no tratamento de luz LED com combinação 3:1, sem diferir estatisticamente do resultado mostrado pela combinação 5:1 que demonstra resultados bastante aproximados.

A MSC obteve resultados significativos em função da cultivar de alface estudada, a Figura 12 nos mostra também que o teor de matéria seca do caule das plantas foram maiores para cultivar de alface crespa.

No caso do caule, um maior valor em peso torna-se um aspecto negativo, sugerindo que a cultivar tem maior suscetibilidade ao pendoamento. Nesse aspecto, a cultivar de alface lisa apresenta uma maior resistência ao

pendoamento. Blat et al. (2011) relatam que tal característica é dependente da cultivar.

A influência da iluminação LED sob as cultivares de alface na variável MFR e MSR mostrou que a cultivar crespa evidenciou maiores resultados (Figura 13).

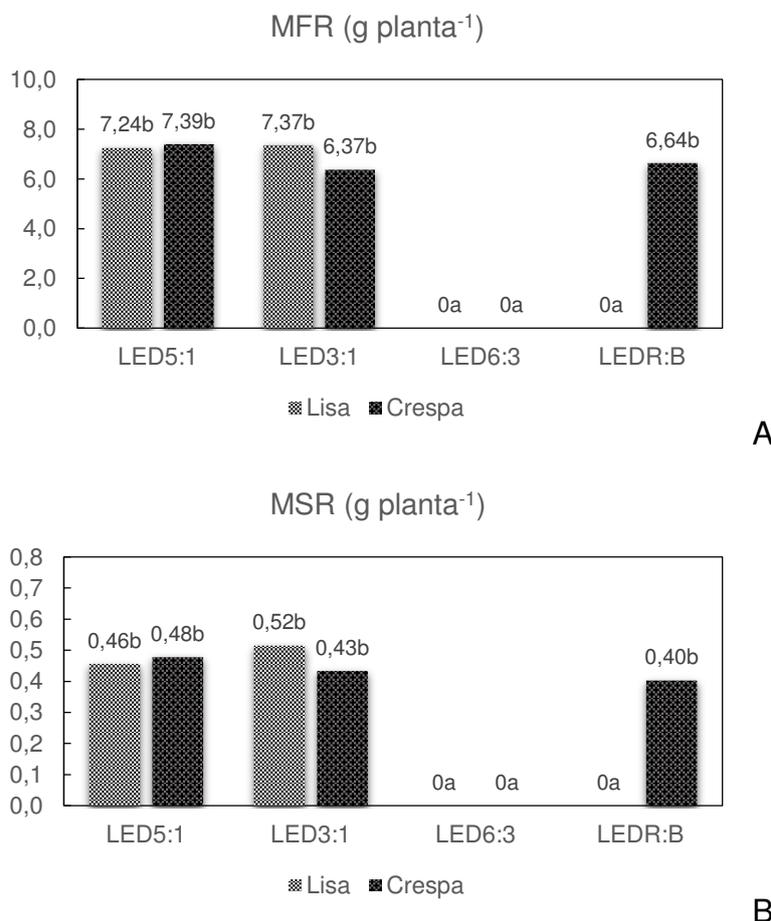


Figura 13. Massa fresca das raízes (MFR) (A) e Massa seca das raízes (MSR) (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

A cultivar de alface lisa apresentou uma maior massa das raízes das plantas na combinação de LED 3:1, na combinação 5:1 a crespa se sobressaiu, embora não tenha ocorrido diferença significativa no teste de comparação de médias para estes tratamentos.

Em seu estudo, Amoozgar et al. (2016) identificaram que as plantas de alface (cv. Grizzly) crescidas em azul + vermelho se apresentaram visualmente melhores que as cultivadas em estufa, já as plantas cultivadas sob LED azul + vermelho tiveram níveis maiores de raiz. No entanto, isso foi alcançado devido a

uma biomassa de raiz muito baixa na ausência de luz azul, ou seja, na câmara de crescimento com LED vermelho puro. Isso pode indicar que a luz LED vermelha pura não é adequada para completar o crescimento total da alface (cv Grizzly) e, embora a luz vermelha possa ter maior contribuição para a fotossíntese da planta do que azul, não foi correlacionada com o aumento de massas frescas e secas das raízes.

4.3. Fisiologia da alface cultivada sob iluminação LED

4.3.1. Trocas gasosas

O resumo da análise de variância relacionado às variáveis de trocas gasosas, Fotossíntese líquida (P_n), Condutância estomática (G_s), Concentração interna de CO_2 (C_i), Transpiração (E) e Eficiência instantânea do uso da água ($EiUA$) da alface cultivada sob iluminação de luzes de LED encontra-se na Tabela 7.

Verifica-se efeito significativo da radiação eletromagnética fornecida pelas diferentes combinações dos diodos emissores de luz (LED) sob todas às variáveis relacionadas as trocas gasosas tanto aos 11, quanto aos 21 DAT. O tipo de cultivar da alface também exerceu efeito significativo em todas as variáveis nas épocas estudadas, exceto para a condutância estomática (G_s) aos 11 DAT. Tratando-se da interação entre os fatores ($L \times C$), apenas a P_n e C_i sofreram efeitos expressivos nas duas avaliações, já para a $EiUA$ apenas aos 11 DAT ocorreu significância (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da análise de variância das variáveis relacionadas às trocas gasosas Fotossíntese Líquida (Pn), Condutância Estomática (Gs), Concentração Interna de CO₂ (Ci) e Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) da alface, Campina Grande, PB, 2018.

	GL	Pn		Gs		Ci		E		EiUA	
		Quadrado Médio									
		DAT									
		11	21	11	21	11	21	11	21	11	21
Iluminação (L)	3	0,283**	1,036**	0,000413**	0,006372**	114721,19**	436182,20**	0,24**	2,67**	1,151*	7,8666**
Cultivar (C)	1	0,316**	0,392**	0,000352 ^{ns}	0,0048**	118952,29**	79327,52**	0,67**	1,99**	1,964*	6,3147**
L x C	3	0,299**	0,294**	0,000135 ^{ns}	0,000606 ^{ns}	89738,40**	92349,64**	0,09 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,875 ^{ns}	1,4287*
Erro	4	0,034	0,018	0,000054	0,000446	1946,42	929,73	0,041	0,1255	0,347	0,389
CV (%)		9,24	20,06	0,71	37,91	6,91	6,32	10,47	31,3	19,69	32,14

GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrados médios; CV: Coeficiente de Variação (transformação $(X+0,5)^{1/2}$); ** Significativo a 1%, significativo a 5% e ^{ns} não significativo pelo teste F de Tukey.

Os valores médios para cada variável de trocas gasosas avaliadas em função dos fatores estudados se encontram na Tabela 8.

Tabela 8. Fotossíntese Líquida (Pn), Condutância estomática (Gs), Concentração interna de CO₂ (Ci), Transpiração (E) e Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 e 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Iluminação	Pn ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Gs ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Ci ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		E ($\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		EiUA (Pn / E)		
	DAT	11	21	11	21	11	21	11	21	11	21
LED5:1		0,643c	0,701d	0,018b	0,053c	367,27b	364,41c	0,55b	1,12c	0,94ab	1,68b
LED3:1		0,395ab	0,466c	0,021b	0,0341bc	384,85b	416,95d	0,48b	0,66b	1,33b	1,62b
LED6:3		0,287a	0a	0,0075a	0a	179,00a	0a	0,23a	0a	0,58a	0a
LEDR:B		0,515bc	0,312b	0,0175a	0,0158ab	369,66b	171,7b	0,46b	0,39b	1,04ab	0,67a
Cultivar	Pn		Gs		Ci		E		EiUA		
DAT	11	21	11	21	11	21	11	21	11	21	
Lisa		0,397a	0,279a	0,0133a	0,0158a	275,42a	197,87a	0,31a	0,34a	0,77 ^a	0,632a
Crespa		0,541b	0,469b	0,0185b	0,0358b	374,98b	278,66b	0,55b	0,75b	1,17b	1,3575b

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Considerando isoladamente o fator iluminação sob a Gs, aos 11 DAT, a combinação LED 3:1 mostrou valores mais elevados, sendo superada pela combinação 5:1 ao fim do período experimental. O aumento da Gs nas folhas ocorre com a diminuição da razão R:B. Estes resultados sugeriram que houve efeito direto da fração B no desenvolvimento estomático, afetando ainda mais a fotossíntese (WANG et al., 2016).

A princípio, o aumento da Gs, pode permitir que as plantas aumentem sua absorção de CO₂ e H₂O com um crescimento em condições favoráveis e aumentar a fotossíntese (KUSUMI et al., 2012), ou seja, uma maior Gs pode promover o fornecimento de CO₂ para o aumento da fotossíntese líquida.

Foi relatado por Retallack (2001) e Lake et al. (2001) que a condutância estomática é inversamente proporcional à concentração de ar ao redor das folhas (no ambiente). Como havia limitação de CO₂ na atmosfera deste experimento, pode-se atribuir a este fato, a baixa atividade fotossintética das plantas.

O fechamento e o número reduzido de estômatos pode estar relacionado a desfolhação sob baixa intensidade luminosa durante o crescimento da alface (MUNEER et al., 2014).

As aberturas estomatais são uma via importante para a transpiração, representando 95% da perda de água das plantas (HE et al., 2006), e a maior taxa de transpiração das plantas foi obtida na combinação de LED 5:1 (Tabela 6).

A alface crespa apresentou-se com maior potencial em eficiência fotossintética tanto aos 11 quanto aos 21 DAT e para todas as variáveis fisiológicas analisadas. Com isso, pode-se afirmar que tal cultivar possui uma melhor adaptabilidade na realização de fotossíntese para as condições de cultivo utilizadas neste experimento.

Na Figura 14, contém o desdobramento da variável iluminação em função das cultivares de alface para a variável resposta Pn (Fotossíntese líquida).

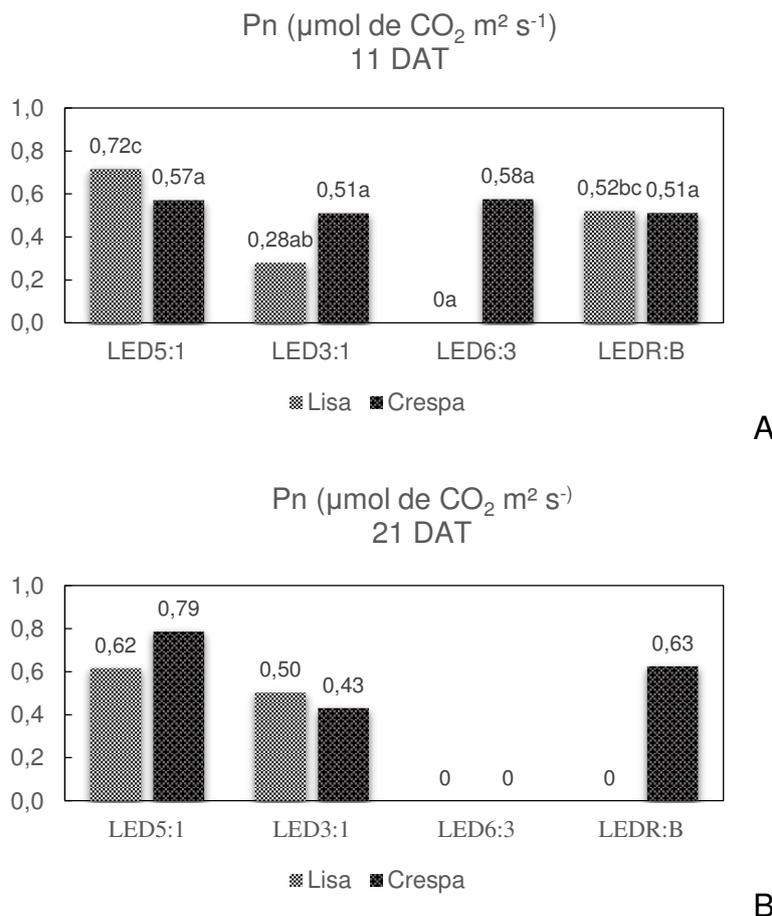


Figura 14. Fotossíntese Líquida (Pn) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 DAT (B), Campina Grande, PB, 2018.

É possível verificar que na aplicação do tratamento de luz LED com combinação 5:1 ocorreram as maiores taxas de fotossíntese líquida (Pn), no entanto, aconteceu redução da Pn para a cultivar de alface lisa, enquanto que a cultivar crespa apresentou resultados ascendentes para a mesma variável (Figura 14).

Para Wang et al. (2016) a combinação de R (vermelho) e B (azul) provou ser eficaz na condução da fotossíntese, aumentando as taxas de fotossíntese com a diminuição da razão R:B até 1, ou seja, proporção igual.

Como dito anteriormente, ter uma faixa do espectro azul e vermelho ideal para a fotossíntese é essencial para sua realização. As plantas sob apenas luz R (Vermelho) apresentam redução da taxa fotossintética líquida em comparação com a luz branca ou vermelha (R) suplementada com azul (B) (WANG et al.,

2015). Além disso, R (vermelho) sozinho ou uma iluminação constante com altas quantidades de B pode ter efeitos negativos, como a taxa de fotossíntese líquida reduzida em muitas espécies devido as respostas de evasão de cloroplasto (WADA et al., 2003 apud WANG et al. 2016). Por tanto, a variação na taxa de fotossíntese líquida dar-se em razão da diferente combinação de luz vermelha e azul que compõem o espectro de luminescência adotado neste experimento.

A menor taxa de fotossíntese em LEDs também pode ser atribuída ao baixo teor de nitrogênio nas folhas, que ocorre em função do teor de clorofila e carotenoides (KIM et al., 2004). A concentração interna de CO₂ para a interação dos fatores estudados pode ser vista na Figura 15.

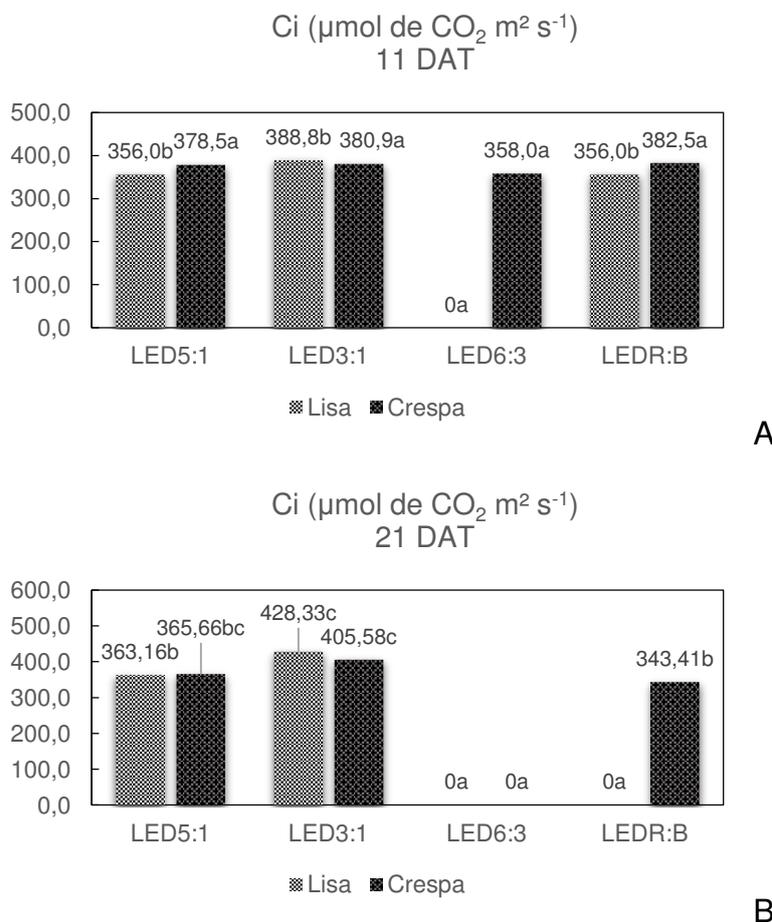


Figura 15. Concentração interna de CO₂ (Ci) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 DAT (B), Campina Grande, PB, 2018.

A cultivar crespa apresentou maior taxa de concentração interna de CO₂, o que está associado a condutância estomática (Gs). Deste modo, a limitação estomática seria o fator principal da limitação do desempenho fotossintético uma vez que, quanto maior a abertura estomática maior a difusão de CO₂ para a câmara subestomática (NASCIMENTO, 2009).

Para Jadoski et al. (2005), o aumento na taxa de assimilação de CO₂ está relacionado à maior concentração de CO₂ presente no interior das folhas, por causa do fechamento estomático em resposta aos estresses abióticos. O aumento verificado na taxa de assimilação de CO₂ pode estar diretamente relacionado ao incremento ocorrido na transpiração. Acrescenta-se ainda que o aumento na resistência da difusão gasosa pode ser fator limitante à taxa de assimilação de CO₂ (PAIVA et al., 2005).

O uso eficiente da água (EiUA) da alface cultivada sob diferentes combinações de luz LED vermelha e azul está explanado na Figura 16.

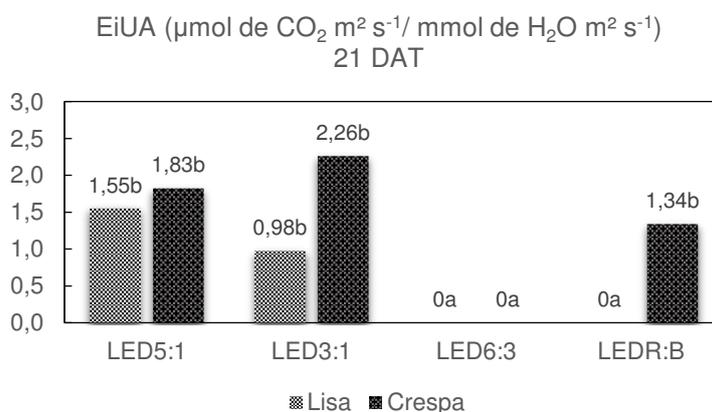


Figura 16. Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) da alface cultivada sob iluminação LED aos 11 (A) e 21 DAT (B), Campina Grande, PB, 2018.

A fonte de variação de luz LED com combinação 3:1 foi mais eficiente em termos de eficiência instantânea de uso da água aos 11 DAT. Aos 21 DAT a luz LED 5:1 demonstrou ser melhor para a EiUA.

A cultivar de alface crespa se mostrou mais conveniente se tratando da eficiência do uso da água para realização de fotossíntese, isso mostra que este tipo de cultivar pode ser melhor adaptada ao cultivo de culturas de interior (câmaras de produção).

Estudando diversas fontes de variação de luz para o cultivo de alface, Lanoue et al. (2017), comprovaram que os tratamentos de luz LED mostram uma EiUA ligeiramente inferior em comparação ao tratamento com luz HPS.

Durante os 21 dias de condução do experimento, a tensão não chegou ao seu estado crítico, ou seja, não foi necessário a realização de irrigação, estabelecendo no ambiente de cultivo o uso mínimo da água. Salienta-se, pois, que quanto menor a disponibilidade de água menor também será o grau de abertura estomática para reduzir a perda d'água; conseqüentemente, a EiUA é maior, mantendo o mínimo de equilíbrio hídrico, e pela alface ser uma planta tipo C3, a assimilação de CO₂ em situações hídricas adversas é limitada.

Clavijo-Herrera et al. (2018) indicam em seus resultados que, a qualidade espectral dos LEDs, e também as condições ambientais de cultivo, podem afetar significativamente o volume de água necessário para produzir plantas de alface em ambientes controlados.

4.3.2. Pigmentos Fotossintetizantes

Pode-se notar na Tabela 9, o resumo da análise de variância dos dados equivalentes ao teor de Clorofila *a*, *b* e carotenoides nas folhas de alface, que a iluminação afetou significativamente o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes de ambas as cultivares estudadas (LxC).

Tabela 9. Resumo da análise de variância para os dados de Clorofila a, b e carotenoides da planta de alface aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Fonte de variação	de GL	Clorofila a	Clorofila b	Carotenoides
		Quadrado Médio		
Iluminação (L)	3	0,936**	0,091**	0,1622**
Cultivar (C)	1	0,710*	0,000208 ^{ns}	0,153002**
LxC	3	1,838**	0,0944298**	0,319062**
Erro	40	0,105	0,005655	0,009116
CV (%)		13,22	5,69	6,07

GL: Graus de Liberdade; QM: Quadrados médios; CV: Coeficiente de Variação (transformação $(X+0,5)^{1/2}$; ** Significativo a 1%, significativo a 5% e ns não significativo pelo teste F de Tukey.

Dentre os tratamentos de luz estudados o LED R:B apresentou maiores teores de clorofila a e carotenoides. Já o teor de clorofila b foi maior na fonte de luz LED 5:1, concordando com os demais resultados apresentados neste estudo (Tabela 10). Os pigmentos fotossintetizantes clorofila a e b possuem alta absorção na região dos comprimentos de onda azul e vermelho. Já os carotenoides possuem absorção na faixa espectral que compreende apenas a luz azul. Este fato justifica o alto índice de carotenoides no tratamento LED R:B, pois há uma maior quantidade de incidência de luz azul nele.

Tais resultados indicam que a absorção dos pigmentos que refletem posteriormente na realização de fotossíntese nas plantas poderia ser melhorada ao diminuir a fração de luz azul (B), já que em termos quantitativos, a fração de LED 5:1 e 3:1 possui uma menor intensidade de irradiação de luz azul quando comparada com os demais tratamentos de luz.

Tabela 10. Clorofila a, Clorofila b e Carotenoides da alface cultivada sob iluminação

LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

Iluminação	Clorofila a	Clorofila b	Carotenoides
LED5:1	0,531667b	0,215833c	0,144167b
LED3:1	0,414286b	0,160714bc	0,123571b
LED6:3	0a	0a	0a
LEDR:B	0,693333b	0,115	0,2975c

Cultivar	Clorofila a	Clorofila b	Carotenoides
Lisa	0,305417a	0,1275a	0,09a
Crespa	0,54875b	0,131667a	0,202917b

Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Rosa et al. (2014) estudando o teor de clorofila a e b em alface tipo crespa em condições tradicionais de cultivo, encontraram resultados de 8 mg/g de matéria fresca para a clorofila a e 2 mg/g para clorofila b, o que comparado aos resultados encontrados neste experimento nos mostra valores bem mais elevados. O teor reduzido de clorofila pode ser usado para monitorar o dano induzido pelo estresse nas folhas (MANNING e TIEDEMANN, 1995). Embora tenha um número considerável de estudos que indicam que a síntese e o conteúdo de Clorofilas (a e b) e carotenoides são maiores em alface e outras plantas tratadas com LEDs azuis em comparação com as outras luzes (JOHKAN et al., 2010; MARKOU, 2014). Isso não foi evidente na alface cultivada neste estudo e os complementos azul + vermelho tiveram o maior efeito na indução da síntese de Chl a e b e carotenoides nas folhas. O que deve ter sido ocasionado também pela limitação de CO₂ dentro da estufa.

Os teores de pigmentos Clorofila a e b nas folhas de alface são mostrados na Figura 17 em função da interação entre os fatores iluminação e cultivar (LxC).

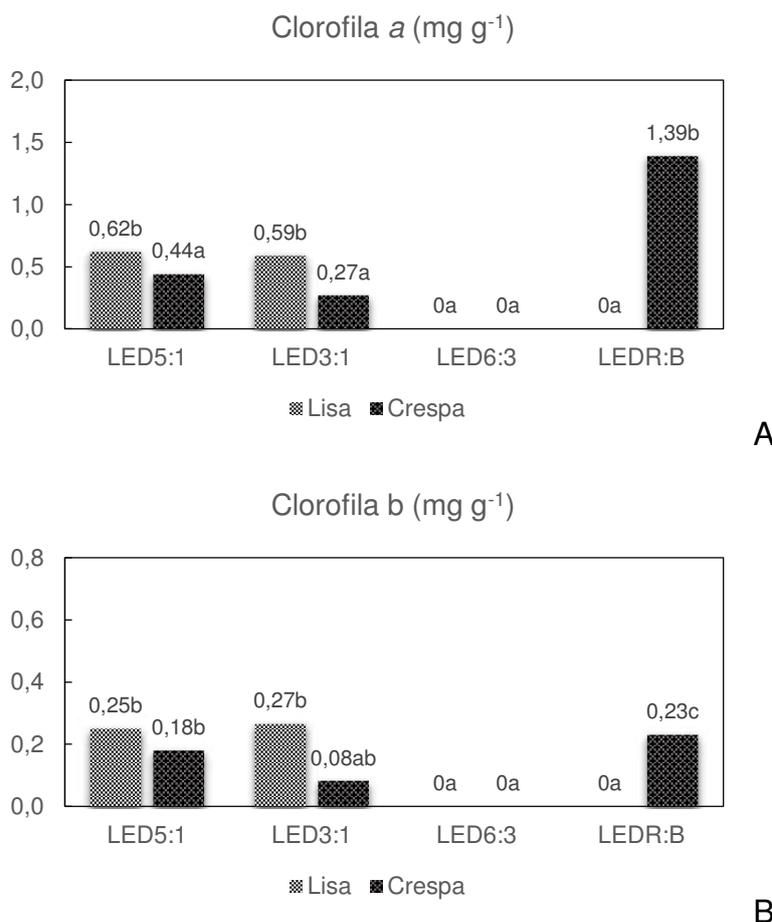


Figura 17. Teor de Clorofila *a* (A) e clorofila *b* (B) das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2019.

Na combinação de luz LED R:B foram identificados teores de Chl *a* bem mais elevados em comparação com as demais. Mas, os resultados anteriores mostram que a fonte de luz R:B não apresentou um valor relativamente alto para as variáveis que indicavam a eficiência fotossintética, sugerindo que apesar de um alto teor de pigmentos fotossintéticos, eles não conseguiram fotossintetizar a energia luminosa liberada pelos LEDs. Isso pode ser explicado pela intensidade e forma que as luzes azuis e vermelhas estavam dispersas, já que no pico de absorção do pigmento, poderia haver um excesso de raios na região do azul ou vermelho, entretanto, não ocorreu a biossíntese.

O teor de clorofila das folhas está relacionado diretamente com a fotossíntese líquida, com isso, as plantas cultivadas sob a combinação de LED 5:1 apresentaram os mais altos índices tanto aos 11 como aos 21 dias após o

transplântio (DAT). Em termos gerais, pode-se afirmar que essa fonte foi mais eficiente, quando se analisa também os resultados relacionados as trocas gasosas.

Tratando-se da cultivar, nota-se, portanto, que a alface lisa apresenta um valor mais elevado de Chl *a* e *b* quando comparada à cultivar de alface crespa, o que elevaria sua capacidade em realizar fotossíntese. Contudo, a absorção da luz das folhas foi afetada pela composição de pigmento neste estudo, assim como para Lee e Kim (2014).

Na Figura 21, pode ser visto o gráfico relativo ao teor de carotenoides que foi maior para o tratamento LED R:B, com a cultivar lisa apresentando maiores resultados. Uma maior acumulação desses pigmentos pode levar a maior absorção de luz, eliminação de reações induzidas pela luz espécies de oxigênio e, como consequência, melhoraram o crescimento do broto (JOHKAN et al., 2010).

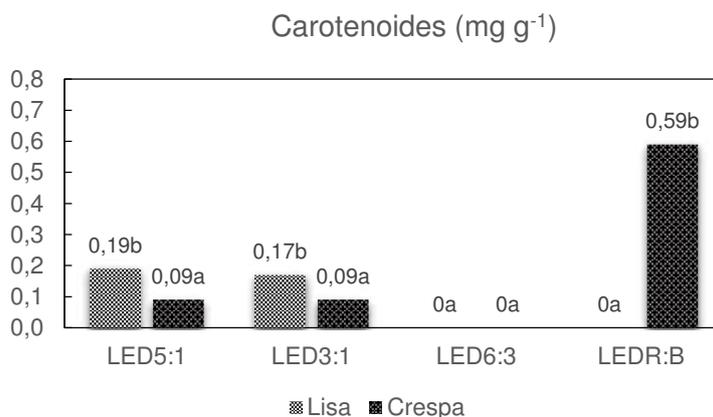


Figura 18. Teor de Carotenoides das cultivares de alface em função da iluminação LED aos 21 DAT, Campina Grande, PB, 2018.

A capacidade fotossíntese das folhas da planta é diretamente proporcional ao R/B de LEDs (HOGEWONING et al., 2010). Esses resultados sugerem que, quando se utiliza fontes de iluminação com diferentes relações R/B, uma LED com maior quantidade de azul aumentaria (que é o caso da fonte de luz R:B) o teor de clorofila, poderia então melhorar a capacidade de captura original de luz e retirar a saúde das alfaces. Desta maneira, pode-se afirmar que a qualidade da

radiação luminosa, que promovem o desenvolvimento das plantas estão associadas às possíveis combinações de luz LED vermelhas e azuis.

5. CONCLUSÕES

Mediante os resultados encontrados nesta pesquisa, foi possível concluir que o maior crescimento e produção das plantas de alface foram observados na fonte de variação de luz LED com combinação 5:1.

O tratamento de luz LED 5:1 foi mais eficiente na realização de fotossíntese pelas plantas.

A cultivar de alface lisa apresenta maior sensibilidade à iluminação LED, enquanto que a cultivar de alface crespa possui uma maior resistência.

A razão R/B ideal requer estudo adicional, bem como a duração da iluminação, e as condições ambientais utilizadas neste tipo de produção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ANUAR, N.; IBRAHIM, N.; AWANG, Y. Different combinations of light spectrum of LED and nitrogen affect the growth and yield of lettuce (*Lactuca sativa*). In: **III International Conference on Agricultural and Food Engineering 1152**. 2016. p. 109-116.

BARTA, D. J. et al. Evaluation of light emitting diode characteristics for a space-based plant irradiation source. **Advances in Space Research**, v. 12, n. 5, p. 141-149, 1992.

BENINCASA M. M. P. Análise de crescimento de plantas: Noções Básicas. Jaboticabal – FUNEP, pg. 41, 1986.

BLAT, Sally F. et al. Desempenho de cultivares de alface crespa em dois ambientes de cultivo em sistema hidropônico. **Horticultura Brasileira**, p. 135-138, 2011.

BOURGET, C. Michael. An introduction to light-emitting diodes. **HortScience**, v. 43, n. 7, p. 1944-1946, 2008.

CANELLA, Daniela Silva et al. Consumo de hortaliças e sua relação com os alimentos ultraprocessados no Brasil. **Revista de Saúde Pública**, v. 52, p. 50-50, 2018.

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

CHOI, Hyo Gil; MOON, Byoung Yong; KANG, Nam Jun. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber. **Scientia Horticulturae**, v. 189, p. 22-31, 2015.

CLAVIJO-HERRERA, Jonathan; VAN SANTEN, Edzard; GÓMEZ, Celina. Growth, water-use efficiency, stomatal conductance, and nitrogen uptake of two lettuce cultivars grown under different percentages of blue and red light. **Horticulturae**, v. 4, n. 3, p. 16, 2018.

COCETTA, Giacomo et al. Light use efficiency for vegetables production in protected and indoor environments. **The European Physical Journal Plus**, v. 132, n. 1, p. 43, 2017.

COPE, Kevin R.; SNOWDEN, M. Chase; BUGBEE, Bruce. Photobiological interactions of blue light and photosynthetic photon flux: Effects of monochromatic and broad-spectrum light sources. **Photochemistry and photobiology**, v. 90, n. 3, p. 574-584, 2014.

FANKHAUSER, Christian; CHORY, Joanne. Light control of plant development. **Annual review of cell and developmental biology**, v. 13, n. 1, p. 203-229, 1997. 1

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

GOINS, Gregory D. et al. **Salad crop production under different wavelengths of red light-emitting diodes (LEDs)**. SAE Technical Paper, 2001.

HAO, X.; LITTLE, C.; KHOSLA, S. LED inter-lighting in year-round greenhouse mini-cucumber production. In: **VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956**. 2012. p. 335-340.

HERNÁNDEZ, R.; KUBOTA, C. Growth and morphological response of cucumber seedlings to supplemental red and blue photon flux ratios under varied solar daily light integrals. **Scientia Horticulturae**, v. 173, p. 92-99, 2014.

HERNÁNDEZ, R.; KUBOTA, C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. **Environmental and experimental botany**, v. 121, p. 66-74, 2016.

HOGEWONING, Sander W. et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown

under different combinations of red and blue light. **Journal of experimental botany**, v. 61, n. 11, p. 3107-3117, 2010.

IJAZ, Faheem et al. Remote management and control system for LED based plant factory using ZigBee and Internet. In: **Advanced Communication Technology (ICACT), 2012 14th International Conference on**. IEEE, 2012. p. 942-946.

JADOSKI, S. O.; KLAR, A. E.; SALVADOR, E. D. Relações hídricas e fisiológicas em plantas de pimentão ao longo de um dia. *Ambiência*, Guarapuava, v. 1, n. 1, p. 11-19, 2005.

JOHKAN, Masahumi et al. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. **HortScience**, v. 45, n. 12, p. 1809-1814, 2010.

JOHKAN, Masahumi. et al. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 75, p. 128-133, 2012.

KIM, Sun-Ja et al. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. **Scientia Horticulturae**, v. 101, n. 1-2, p. 143-151, 2004.

KUSUMI, Kensuke et al. Increased leaf photosynthesis caused by elevated stomatal conductance in a rice mutant deficient in SLAC1, a guard cell anion channel protein. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 15, p. 5635-5644, 2012.

LAKE, J. A. et al. Plant development: signals from mature to new leaves. **Nature**, v. 411, n. 6834, p. 154, 2001.

LANOUE, Jason et al. The effect of spectral quality on daily patterns of gas exchange, biomass gain, and water-use-efficiency in tomatoes and lisianthus: An assessment of whole plant measurements. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1076, 2017.

LANOUE, Jason et al. The effect of spectral quality on daily patterns of gas exchange, biomass gain, and water-use-efficiency in tomatoes and lisianthus: An assessment of whole plant measurements. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1076, 2017.

LAZZARINE, Luiz Eduardo dos Santos et al. Uso de diodos emissores de luz (led) na fisiologia de plantas cultivadas. **Scientia Agraria Paranaensis**. v. 16, n. 2, p. 137-144, 2017.

LEE, JaeSu et al. Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. **Korean Journal of Horticultural Science & Technology**, v. 32, n. 3, p. 330-339, 2014.

LEE, Jun-Gu et al. Effects of red/blue light ratio and short-term light quality conversion on growth and anthocyanin contents of baby leaf lettuce. **Journal of Bio-Environment Control**, 2010.

LEE, Myung-Jin; PARK, So-Young; OH, Myung-Min. Growth and cell division of lettuce plants under various ratios of red to far-red light-emitting diodes. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 56, n. 2, p. 186-194, 2015.

LEE, Myung-Jin; SON, Ki-Ho; OH, Myung-Min. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 57, n. 2, p. 139-147, 2016.

LEONARDOS, Evangelos D. et al. Photosynthetic capacity of the inflorescence is a major contributor to daily-C-gain and the responsiveness of growth to elevated CO₂ in *Arabidopsis thaliana* with repressed expression of mitochondrial-pyruvate-dehydrogenase-kinase. **Environmental and experimental botany**, v. 107, p. 84-97, 2014.

LI, Qian; KUBOTA, Chieri. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. **Environmental and Experimental Botany**, v. 67, n. 1, p. 59-64, 2009.

LIN, Kuan-Hung et al. 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**, v. 150, p. 86-91, 2013.

MANNING, William J.; TIEDEMANN, Andreas V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, v. 88, n. 2, p. 219-245, 1995.

MARQUELLI, W. A. Tensiômetro para o controle de irrigação em hortaliças. **Embrapa Hortaliças. Circular Técnica**, 2008.

MASSA, Gioia D. et al. Plant productivity in response to LED lighting. **HortScience**, v. 43, n. 7, p. 1951-1956, 2008.

MITCHELL, C. A. Plant lighting in controlled environments for space and earth applications. In: **VII International Symposium on Light in Horticultural Systems 956**. 2012. p. 23-36.

MITCHELL, Cary A. et al. Horticultural Science Focus-LEDs: The Future of Greenhouse Lighting!. **Chronica Horticulturae-Subscription**, v. 52, n. 1, p. 6, 2012.

MIYAGI, Atsuko; UCHIMIYA, Hirofumi; KAWAI-YAMADA, Maki. Synergistic effects of light quality, carbon dioxide and nutrients on metabolite compositions of head lettuce under artificial growth conditions mimicking a plant factory. **Food chemistry**, v. 218, p. 561-568, 2017.

MORROW, Robert C. LED lighting in horticulture. **HortScience**, v. 43, n. 7, p. 1947-1950, 2008.

MUNEER, Sowbiya et al. 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 sciences**, v. 15, n. 3, p. 4657-4670, 2014.

NASCIMENTO, Junea Leandro do. Crescimento e assimilação de carbono em plantas jovens de *Attalea funifera* Mart. submetidas ao sombreamento e ao estresse hídrico. **Ilhéus, 2009. 110p**, 2009.

NHUT, Duong Tan et al. Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 73, n. 1, p. 43-52, 2003.

NOVAIS, RF de; NEVES, Júlio Cesar Lima; BARROS, NF de. Ensaio em ambiente controlado. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo. Brasília: Embrapa-SEA**, p. 189-253, 1991.

OLLE, Margit; VIRŠILE, Akvile. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. **Agricultural and food science**, v. 22, n. 2, p. 223-234, 2013.

OUZOUNIS, Theoharis et al. Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. **Frontiers in plant science**, v. 6, p. 19, 2015.

PAIVA, Auricleia S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, p. 161-169, 2005.

PINHEIRO, Renes Rossi. **Suplementação luminosa no tomateiro cultivado em diferentes sistemas de condução em ambiente protegido**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

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**. 0 p 1-16. 2016.

RETALLACK, Gregory J. A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles. **Nature**, v. 411, n. 6835, p. 287, 2001.

ROSA, Aline Mabel et al. Production and photosynthetic activity of Mimosa Verde and Mimosa Roxa lettuce in two farming systems. **Revista Ceres**, v. 61, n. 4, p. 494-501, 2014.

SHEN, Yunze et al. Research on lettuce growth technology onboard Chinese Tiangong II Spacelab. **Acta Astronautica**, v. 144, p. 97-102, 2018.

SON, Ki-Ho; OH, Myung-Min. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. **HortScience**, v. 48, n. 8, p. 988-995, 2013.

STOKKOM et al. The role of smell, taste, flavour and texture cues in the identification of vegetables. **Appetite**, v. 121, n.1, p. 69-76, 2018.

TROUWBORST, Govert et al. The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. **Physiologia Plantarum**, v. 138, n. 3, p. 289-300, 2010.

TSUKAYA, Hirokazu. Genetic evidence for polarities that regulate leaf morphogenesis. **Journal of Plant Research**, v. 111, n. 1, p. 113-119, 1998.

WALLACE, C.; BOTH, A. J. Evaluating operating characteristics of light sources for horticultural applications. In: **VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134**. 2016. p. 435-444.

WANG, Hong et al. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 96, n. 1, p. 30-37, 2009.

WANG, Jun et al. 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, 2016.

WANG, X. Y.; XU, X. M.; CUI, J. The importance of blue light for leaf area expansion, development of photosynthetic apparatus, and chloroplast

ultrastructure of *Cucumis sativus* grown under weak light. **Photosynthetica**, v. 53, n. 2, p. 213-222, 2015.

WEIGUO, Fu et al. 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.

WOJCIECHOWSKA, Renata et al. Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. **Scientia Horticulturae**, v. 187, p. 80-86, 2015.

XU, Yingchao et al. The research on LED supplementary lighting system for plants. **Optik-International Journal for Light and Electron Optics**, v. 127, n. 18, p. 7193-7201, 2016.

YEH, Naichia; CHUNG, Jen-Ping. High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 8, p. 2175-2180, 2009.

YORIO, Neil C. et al. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. **HortScience**, v. 36, n. 2, p. 380-383, 2001.

ZHANG, Tao et al. The effect of different spectral LED lights on the phenotypic and physiological characteristics of lettuce (*Lactuca sativa*) flatpicking stage. **J Biochem**, v. 1, n. 1, p. 14, 2017.