

PERFIL METABÓLICO DE MUDAS DE ALFACE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO SAZONAL EM AMBIENTE PROTEGIDO EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL

METABOLIC PROFILE OF LETTUCE SEEDLINGS AS A FUNCTION OF SEASONAL VARIATION IN A PROTECTED ENVIRONMENT IN A TROPICAL CLIMATE REGION

PERFIL METABÓLICO DE PLÁNTULAS DE LECHUGA EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN ESTACIONAL EN UN AMBIENTE PROTEGIDO EN UNA REGIÓN CLIMÁTICA TROPICAL

 <https://doi.org/10.56238/arev7n8-104>

Data de submissão: 13/07/2025

Data de publicação: 13/08/2025

Lia Mara da Silva Gomes
Mestra em Produção Vegetal
Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
(UENF)
E-mail: Liamara32@gmail.com

Cláudia Lopes Prins
Doutora em Produção Vegetal
Instituição: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
(UENF)
E-mail: Prins@uenf.br

RESUMO

A alface (*Lactuca sativa* L.) é a hortaliça folhosa mais cultivada no Brasil. O cultivo da alface, no entanto, exige condições ambientais específicas para seu desenvolvimento adequado, sendo a faixa entre 15°C e 20°C de temperatura, a ideal para sua germinação. Fora desse intervalo, há uma redução significativa na taxa de germinação e no crescimento das plântulas. A produção de mudas de alface geralmente é realizada em estufas agrícolas, que oferecem ambiente protegido. Contudo, o microclima no interior da estufa pode variar com as estações do ano, influenciando diretamente o metabolismo da planta e a qualidade das mudas. O presente estudo teve como objetivo verificar as respostas metabólicas da alface em diferentes estações do ano, avaliando o acúmulo de prolina, carboidratos, compostos fenólicos e a peroxidação lipídica. As análises foram realizadas em três grupos de alface (Lisa, Crespa e Americana), observando os efeitos das estações (verão, outono, inverno e primavera) no metabolismo dessas plantas. Os resultados indicaram variações significativas no teor de prolina, que foi maior durante o verão em comparação com as outras estações, indicando uma resposta ao estresse térmico. O acúmulo de carboidratos e compostos fenólicos também variou entre as estações, com destaque para a primavera, onde houve um aumento expressivo desses compostos. A peroxidação lipídica, indicador de estresse oxidativo, apresentou menores níveis durante o inverno e primavera, sugerindo que as plantas estavam em condições menos estressantes nessas épocas. O microclima da estufa e as variações sazonais influenciaram diretamente o metabolismo da alface. A prolina, os carboidratos e os compostos fenólicos são importantes indicadores dessa resposta adaptativa, sendo o verão a estação mais desafiadora para o desenvolvimento da planta, e a primavera, a mais favorável.

Palavras-chave: *Lactuca sativa* L. Metabólicos. Estresses Abióticos.

ABSTRACT

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is the most widely cultivated leafy vegetable in Brazil. However, lettuce cultivation requires specific environmental conditions for proper development, with a temperature range between 15°C and 20°C being ideal for germination. Outside this range, there is a significant reduction in germination rate and seedling growth. Lettuce seedling production is typically carried out in agricultural greenhouses, which offer a protected environment. However, the microclimate inside the greenhouse can vary with the seasons, directly influencing the plant's metabolism and seedling quality. This study aimed to verify the metabolic responses of lettuce in different seasons, evaluating the accumulation of proline, carbohydrates, phenolic compounds, and lipid peroxidation. Analyses were performed on three groups of lettuce (plain, curly, and American), observing the effects of seasons (summer, fall, winter, and spring) on the metabolism of these plants. The results indicated significant variations in proline content, which was higher during summer compared to other seasons, indicating a response to heat stress. The accumulation of carbohydrates and phenolic compounds also varied between seasons, particularly in spring, where there was a significant increase in these compounds. Lipid peroxidation, an indicator of oxidative stress, was lower during winter and spring, suggesting that the plants were under less stressful conditions during these periods. The greenhouse microclimate and seasonal variations directly influenced lettuce metabolism. Proline, carbohydrates, and phenolic compounds are important indicators of this adaptive response, with summer being the most challenging season for plant development, and spring the most favorable.

Keywords: *Lactuca sativa* L. Metabolics. Abiotic Stresses.

RESUMEN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es la hortaliza de hoja más cultivada en Brasil. Sin embargo, su cultivo requiere condiciones ambientales específicas para su correcto desarrollo, siendo ideal para la germinación un rango de temperatura entre 15 °C y 20 °C. Fuera de este rango, se observa una reducción significativa en la tasa de germinación y el crecimiento de las plántulas. La producción de plántulas de lechuga se realiza típicamente en invernaderos agrícolas, que ofrecen un ambiente protegido. Sin embargo, el microclima dentro del invernadero puede variar con las estaciones, lo que influye directamente en el metabolismo de la planta y la calidad de las plántulas. Este estudio tuvo como objetivo verificar las respuestas metabólicas de la lechuga en diferentes estaciones, evaluando la acumulación de prolina, carbohidratos, compuestos fenólicos y peroxidación lipídica. Se realizaron análisis en tres grupos de lechuga (simple, rizada y americana), observando los efectos de las estaciones (verano, otoño, invierno y primavera) en el metabolismo de estas plantas. Los resultados indicaron variaciones significativas en el contenido de prolina, que fue mayor durante el verano en comparación con otras estaciones, lo que indica una respuesta al estrés térmico. La acumulación de carbohidratos y compuestos fenólicos también varió entre estaciones, especialmente en primavera, donde se observó un aumento significativo de estos compuestos. La peroxidación lipídica, un indicador de estrés oxidativo, fue menor durante el invierno y la primavera, lo que sugiere que las plantas se encontraban en condiciones menos estresantes durante estos períodos. El microclima del invernadero y las variaciones estacionales influyeron directamente en el metabolismo de la lechuga. La prolina, los carbohidratos y los compuestos fenólicos son indicadores importantes de esta respuesta adaptativa, siendo el verano la estación más desafiante para el desarrollo de la planta y la primavera la más favorable.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L. Metabolismo. Estreses Abióticos.

1 INTRODUÇÃO

A alface é uma hortaliça folhosa, de amplo cultivo no Brasil, que produz cerca de 660 mil toneladas, com grande expectativa de aumento no consumo nos próximos anos. Dentre as hortaliças folhosas, a alface é a mais consumida, e possui diversas variedades de tipos roxas, crespa, lisa, americana ZANDONADI (2022). As principais regiões de produção comercial são Sudeste e o Sul, com cerca de 90% da produção, sendo Minas Gerais com produção de 49.742 t, Rio de Janeiro com produção de 98.327 t e São Paulo com produção de 268.139 t, segundo o último censo do IBGE (2017). No estado do Rio de Janeiro, a Região Serrana tem destaque na produção.

As temperaturas ótimas para a germinação das sementes de alface variam entre 15°C e 20°C, e fora dessa faixa de temperatura, a taxa de germinação das sementes e o crescimento de plântulas podem ser prejudicados. Temperaturas superiores à faixa ótima causam diversas alterações nas plantas e ativam mecanismos de defesa ou adaptação, que têm custos metabólicos e resultam na redução do crescimento e produção HASSAN et al., (2021). Os efeitos da temperatura elevada sobre a produção comercial de alface são conhecidos, tais como, o pendoamento, a antecipação da fase vegetativa, diminuição da cabeça e a produção de látex, tornando a comercialização inviável, pois libera sabor amargo nas folhas. Porém, há poucos estudos em relação à fase de mudas e as consequências sobre o desempenho após o transplantio.

A produção de mudas caracteriza-se como uma etapa da cadeia produtiva de hortaliças com produtores especializados. A produção de mudas para o cultivo de hortaliças deve ser realizada em ambiente protegido para assegurar a qualidade fitossanitária. Em ambientes protegidos, o ar aquecido não se dissipa facilmente, levando ao aumento da temperatura interna em comparação ao ambiente externo SILVA et al., (2003); Rebouças et al.,(2015) indicando que a temperatura dentro dessas estruturas pode ser até 9°C mais alta do que fora delas, especialmente em regiões tropicais, onde as temperaturas podem chegar a 50°C entre o meio-dia e às 14h FURLAN e FOLEGATTI (2002). Isso representa um desafio para as plantas, pois o excesso de calor pode prejudicar o crescimento.

Frequentemente, estudos sobre os efeitos do estresse por calor avaliam a resposta de plantas submetendo-as a um período abrupto de temperaturas elevadas, ou a uma exposição moderada, seguida de um período sob temperaturas adequadas e nova exposição ao estresse em câmaras de crescimento MITTLER et al., (2012). Em condições naturais como, por exemplo, no viveiro, o aumento da temperatura é gradual levando a propiciar termotolerância e, consequentemente, respostas diferentes das observadas em laboratório.

Identificar mecanismos chave de respostas de mudas de alface às alterações do microclima em ambiente protegido é essencial para estabelecer práticas de manejo que proporcionem a estas mudas

condições de adaptação às temperaturas elevadas no viveiro e no campo, especialmente quando a produção é realizada em regiões de clima tropical.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As mudas de alface foram produzidas em bandejas (128 células) preenchidas com substrato comercial para hortaliças, com irrigação através de sistema automatizado, a cada duas horas, por dois minutos, foi necessário realizar ajustes na frequência da irrigação de acordo com estação. Após a emissão das primeiras folhas definitivas foi realizada aplicação semanal de solução nutritiva comercial (Florisol®) de acordo com a recomendação do fabricante.

Foram realizados quatro experimentos nos meses de fevereiro, maio, julho e setembro correspondente às estações verão, outono, inverno e primavera, sob delineamento experimental em blocos casualizados com quatro repetições.

Foram produzidas mudas dos grupos de alface, isto é, lisa, crespa e americana, cultivares Moana, Delicia e Litorânea, respectivamente. A parcela foi composta por um conjunto de quatro linhas para cada cultivar de alface, utilizando-se seis células, totalizando 24 mudas, de forma que uma bandeja comportou três parcelas, a alface roxa foi semeada na bordadura.

A colheita foi realizada pela manhã, 21 dias após a semeadura. As mudas foram levadas para o laboratório onde foram lavadas em água corrente para retirar todo o excesso de substrato e dispostas em papel toalha para retirar o excesso de umidade. Após a limpeza, amostra com seis mudas foram envoltas em papel alumínio e imersas em nitrogênio líquido. Em seguida, foram mantidas em ultra-freezer até a realização das análises.

A avaliação do teor de prolina BATES (1973) foi conduzida sob baixa temperatura a fim de evitar a degradação enzimática. As amostras (1 g de folhas, definida em testes preliminares) foi macerada em almofariz com 5 mL de ácido sulfosalicílico. O macerado foi submetido à filtragem (Whatmann 2) e ao filtrado foram acrescentados 2 mL de ácido acético e 2 mL de nihidrina ácida. A solução foi então aquecida em banho-maria a 90°C por 25 minutos. Ao término do processo o material foi mantido em banho de gelo por 15 minutos. Após o resfriamento acrescentou-se 4 mL de tolueno com agitação por 15 a 20 segundos. A leitura foi realizada em espectrofotômetro (520 nm). A concentração de prolina (mg/g massa fresca) por meio de equação de regressão, estimada a partir de curva padrão de prolina.

A peroxidação lipídica da membrana foi determinada a partir da quantificação dos produtos de reação com ácido tiobarbitúrico (TBARS). Para tanto, a 1 g de folhas foram acrescentados 3 mL de ácido tricloroacético para maceração utilizando-se almofariz. O material resultante foi transferido para

microtubos e submetidos à centrifugação por 20 minutos a 15000 rpm. Após a centrifugação, 1 mL do sobrenadante foi transferido para um tubo de ensaio, ao qual foram adicionados 1 mL de ácido tricloroacético e 100 mL de uma solução de BHT a 4% em etanol. O material resultante foi submetido a aquecimento (95°C por 30 minutos) e ao atingir a temperatura ambiente foi realizada a leitura em espectrofotômetro 532 nm. A quantificação dos produtos de oxidação foi realizada segundo o método descrito por DAVENPORT et al. (2003), utilizando a curva padrão de malondialdeído (MDA) para a determinação da concentração de TBARS.

O processo de quantificação dos compostos fenólicos totais foi realizado reagente Folin-Ciocalteu. Às amostras de 1g de folhas foram adicionados 5 mL demetanol e procedendo-se a maceração em almofariz. A solução resultante foi transferida para microtubos e centrifugadas a 10000 rpm por 10 minutos. Em seguida uma alíquota de 0,2 mL do sobrenadante foram transferidos para tubos de ensaio e a estes adicionados 2 mL de água e 0,1mL do reagente Folin-Ciocalteu. Após três minutos, acrescentou-se a esta solução 0,75 mL de carbonato (Na_2CO_3) e 1 mL de água. Foi realizada homogeneização e incubação (1h) em temperatura ambiente. A determinação do teor dos compostos fenólicos totais foi realizada de acordo com a metodologia proposta por ZHOU et al. (2021).

O teor de compostos fenólicos totais foi calculado como equivalente ácido gálico em mg por g de massa fresca de folhas.

Para a quantificação dos teores de carboidratos seguiu a metodologia proposta por ALBALASMEH et al. (2013), onde 1g de matéria fresca que foi macerado em água (5 mL). O macerado foi submetido à centrifugação a 1000 rpm por 60 minutos. Após a centrifugação uma alíquota de 1 mL do sobrenadante foi transferido para tubos de ensaio aos quais foram adicionados 3 mL de ácido sulfúrico concentrado, em seguida, sendo resfriado em banho de gelo por 2 minutos. A absorbância foi obtida a 315 nm. A determinação da concentração dos carboidratos seguiu a metodologia proposta por

Os dados foram submetidos à análise conjunta e quando verificado efeitos significativos dos fatores ou interações foi realizado o teste de comparação de médias Tukey a 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas médias no interior da estufa foram maiores que as temperaturas no observadas no ambiente externo (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1. Temperaturas médias ($^{\circ}\text{C}$) no ambiente externo no verão, outono, inverno e primavera de 2023:

TEMPERATURAS EXTERNAS 2023		
TEMPERATURAS	MÁX $^{\circ}\text{C}$	MIN $^{\circ}\text{C}$
VERÃO	37,8	21,3
OUTONO	32,1	14,4
INVERNO	35,4	13,2
PRIMAVERA	35,5	18,4

Foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

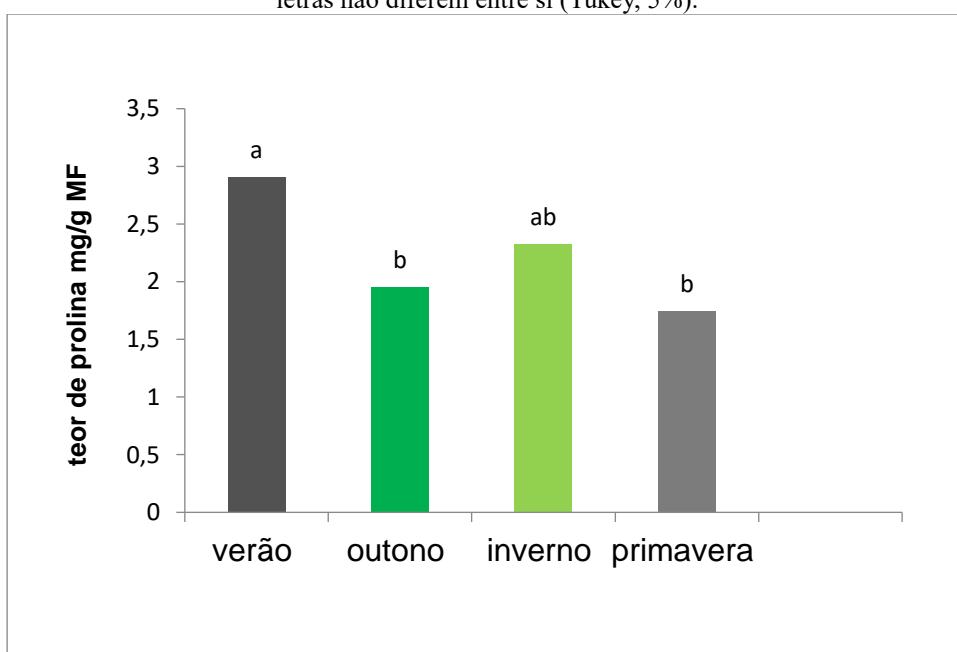
Tabela 2. Temperaturas médias ($^{\circ}\text{C}$) no interior da estufa de produção de mudas (viveiro) no verão, outono, inverno e primavera de 2023:

TEMPERATURAS INTERNAS 2023		
TEMPERATURAS	MÁX $^{\circ}\text{C}$	MIN $^{\circ}\text{C}$
VERÃO	46,1	20,3
OUTONO	42,3	15,9
INVERNO	38,6	13,7
PRIMAVERA	45,8	17,2

Temperaturas Internas mensuradas diretamente no ambiente protegido utilizando datalogger.

Observou-se que durante o verão os teores de prolina atingiram os valores médios mais elevados, 2,903 mg/g MF (Figura 01). Este resultado é consistente com a literatura, que descreve a acumulação de prolina como um dos principais mecanismos de resposta das plantas ao estresse abiótico, particularmente ao estresse térmico e hídrico, ambos acentuados durante a estação mais quente do ano ASHRAF E FOOLAD (2007); RIBEIRO et al. (2021).

Figura 01. Teor de prolina em mudas de alface produzidas em diferentes estações do ano. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si (Tukey, 5%).



No inverno, os níveis de prolina se mantiveram intermediários (2,324 mg/g MF), sem diferença estatística significativa em relação às demais estações. As estações de outono e primavera apresentaram os menores teores de prolina (1,951 e 1,742 mg/g MF, respectivamente), ambos sem diferenças estatísticas entre si.

A prolina é um aminoácido que desempenha papel central na resposta das plantas ao estresse ambiental, principalmente em condições adversas como a seca, temperaturas extremas e salinidade. A sua função está associada à osmoproteção, regulação do equilíbrio osmótico das células, além de atuar como antioxidante, protegendo as plantas contra o estresse oxidativo RIBEIRO et al., (2021). Os resultados obtidos sobre os teores de prolina em mudas de alface ao longo das quatro estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera) revelam variações sazonais marcantes.

Esses resultados estão de acordo com estudos que mostram que o calor excessivo pode induzir o acúmulo de prolina, mesmo em condições em que o estresse hídrico não é predominante. Segundo ASHRAF E FOOLAD (2007), a prolina é comumente acumulada em resposta a altas temperaturas para ajudar na estabilização de proteínas e membranas celulares, funcionando também como um eliminador de espécies reativas de oxigênio (ROS) causadas pelo calor.

Os teores de prolina diminuíram no experimento de outono, com uma média de 1,951 mg/g MF. Esta redução pode estar associada ao fato de o outono ser uma estação de transição, com temperaturas mais amenas e menor necessidade de resposta ao estresse térmico. A diminuição no acúmulo de prolina pode indicar que as condições ambientais estão menos adversas, o que reduz a demanda por mecanismos de defesa metabólicos.

Já os níveis de prolina no inverno podem estar associados à resposta das plantas ao estresse por baixas temperaturas, que também desencadeia o acúmulo desse osmólito para proteção celular. De acordo com ASHRAF E FOOLAD (2007), o acúmulo de prolina ocorre frequentemente em resposta ao estresse abiótico, como altas temperaturas no verão e frio intenso no inverno. Esse comportamento é descrito por MISRA E GUPTA (2006), que observaram que a prolina tende a diminuir quando as plantas se encontram em condições ideais de crescimento.

Houve interação significativa entre os fatores grupos de alface e estações do ano para a variável peroxidação lipídica (Tabela 3).

Tabela 3. Efeito da interação grupo de alface x estações para teores de malondialdeído (MDA) (g MDA·g⁻¹ de folhas frescas) em mudas de alface:

Grupo	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Lisa	0,0151 Aa	0,0110 Bab	0,0102 Aab	0,0105 Ab
Crespa	0,0131 Aa	0,0105 Ba	0,0114 Aa	0,0104 Aa
Americana	0,0129 Aab	0,0171 Aa	0,0111 Ab	0,0102 Ab

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na vertical não diferem entre si, médias seguidas da mesma letra minúscula na horizontal não diferem entre si (Tuckey 5%).

A peroxidação lipídica, medida pelo malondialdeído (MDA), é uma forma de avaliar o dano causado às membranas celulares devido ao estresse oxidativo. O processo é intensificado por condições ambientais adversas, como temperaturas extremas e alta exposição à luz solar OLIVEIRA (2022).

Durante o verão, os níveis de MDA foram elevados na alface Lisa, que apresentou o valor mais alto (0,0151 g MDA/g de matéria fresca). Isso sugere que a alface Lisa é mais suscetível ao estresse oxidativo causado pelas altas temperaturas e pela radiação solar intensa. As variedades de alface crespa e americana apresentaram médias semelhantes. O estudo de OLIVEIRA (2022) destaca que, em condições de calor excessivo, a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) aumenta nas plantas, promovendo a peroxidação lipídica. A alface Crespa e Americana também foram afetadas, mas em menor grau, possivelmente devido a uma maior capacidade de tolerância ao calor e mecanismos de defesa antioxidantes mais eficientes. No outono a alface americana, registrou-se o maior valor de malondialdeído (MDA) atingido 0,0171 g, superando tanto os valores observados nas outras estações quanto os dos demais grupos nesse período.

Este resultado indica resposta ao estresse ambiental, possivelmente associada à transição das condições climáticas e ao aumento das oscilações térmicas características da estação, que já registra elevação da temperatura. Nos demais períodos, os níveis de MDA deste grupo permaneceram baixos e similares aos dos outros grupos, sugerindo que a sensibilidade observada seja específica ao outono OLIVEIRA (2022). Segundo ALMEIDA (2018), as mudanças sazonais podem influenciar significativamente os mecanismos antioxidantes das plantas. A alface Lisa e Crespa parecem se adaptar melhor a essa transição, apresentando menor estresse oxidativo, enquanto a Americana enfrenta mais dificuldades para ajustar seu metabolismo às novas condições.

A alface crespa apresentou estabilidade dos níveis de MDA o que sugere uma maior resiliência frente às flutuações sazonais. Possivelmente a cultivar do estudo apresenta aspectos que conferem maior eficiência nos mecanismos antioxidantes.

Na primavera, os níveis de MDA entre as variedades foram bastante semelhantes, com valores próximos de 0,010 g.

As condições climáticas desta estação, caracterizadas por temperaturas moderadas e uma quantidade equilibrada de luz solar, são ideais para o crescimento das plantas, permitindo que elas operem com um mínimo de estresse oxidativo OLIVEIRA (2022). Nesse período, o equilíbrio entre a produção de radicais livres e a capacidade antioxidante das plantas parece ser melhor controlado, o que resulta em baixos níveis de MDA para todas as variedades de alface.

Entre os tipos das alfaces analisadas, a alface Lisa demonstrou ser a mais vulnerável ao estresse oxidativo no verão, possivelmente devido a uma menor capacidade de adaptação ao calor extremo. Já a alface Americana, embora tenha apresentado maior resistência durante o verão, mostrou-se mais sensível no outono. A alface Crespa, por outro lado, exibiu uma resposta mais consistente ao longo das estações, com variações menores nos níveis de MDA, o que pode indicar uma maior resiliência às mudanças climáticas OLIVEIRA (2022).

Esses resultados confirmam estudos anteriores que mostram que diferentes variedades de alface possuem capacidades antioxidantes e tolerâncias ao estresse ambiental variadas. As variedades com mecanismos antioxidantes mais eficazes tendem a apresentar menores níveis de peroxidação lipídica e, consequentemente, são menos suscetíveis aos danos causados pelas condições ambientais adversas OLIVEIRA (2021).

Os dados indicaram que há uma clara interação entre os grupos de alface e as condições sazonais no que diz respeito à peroxidação lipídica. A variedade Lisa parece ser mais vulnerável durante o Verão, a Crespa apresenta maior peroxidação lipídica durante o verão. Por outro lado, a variedade Americana destaca-se por apresentar o valor mais elevado durante o Outono, possivelmente devido ao estresse associado às baixas temperaturas. Este comportamento diferencial pode ser atribuído às características fisiológicas de cada variedade, que respondem de forma distinta às condições ambientais específicas de cada estação.

A peroxidação lipídica está diretamente relacionada com a degradação de ácidos nas membranas celulares, provocada por condições de estresse, como temperaturas extremas, excesso de luz, ou deficiência hídrica, que comprometem a integridade celular e o funcionamento das plantas MITTLER (2002).

Os resultados indicam que cada cultivar pode ter mecanismos de resistência ou suscetibilidade diferentes a esses fatores, possivelmente, devido a variações de temperatura e maior disponibilidade de luz. Por fim, a alface Crespa apresenta maior sensibilidade durante o verão, o que pode estar relacionado com o aumento da intensidade luminosa e das temperaturas. Esses resultados são consistentes com pesquisas recentes que mostram como diferentes cultivares de plantas possuem

distintas capacidades de lidar com variações sazonais de estresse ambiental SANTOS (2021); LIMA et al., (2020); OLIVEIRA et al. (2022).

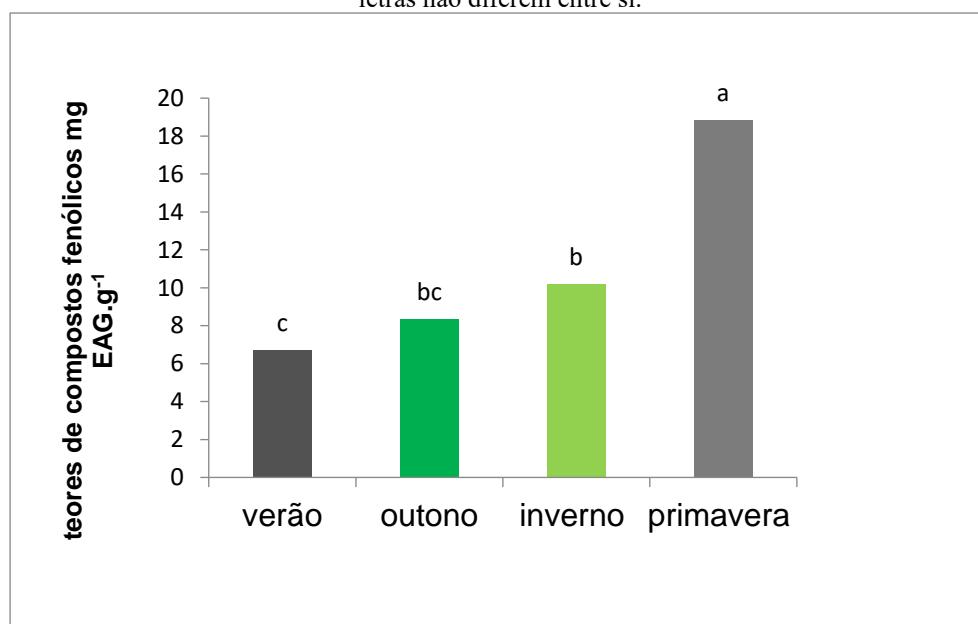
Em estudos que investigam o papel dos antioxidantes durante a germinação das sementes, foi observado que os mecanismos que protegem as células contra o oxigênio ativado (ou espécies reativas de oxigênio) são, em sua maioria, enzimáticos. Isso significa que as enzimas desempenham um papel fundamental na defesa das sementes contra o estresse oxidativo RESENDE (2006).

Esses resultados estão de acordo com estudos que mostram que diferentes tipos de alface têm diferentes capacidades de combater o estresse oxidativo, dependendo da sua variedade e da estação do ano SILVA et al., (2020). Alfaces com melhores mecanismos antioxidantes conseguem neutralizar mais facilmente os radicais livres, prevenindo danos celulares e promovendo um crescimento mais saudável.

Os teores de compostos fenólicos em mudas de alface em função das estações foram determinados. Os compostos fenólicos desempenham um papel essencial na defesa das plantas contra estresses ambientais, atuando como antioxidantes naturais.

Verificou-se que as plantas apresentaram variação nos valores de compostos fenólicos com médias de $6.701163 \text{ mg EAG.g}^{-1}$ de matéria fresca no verão, a $18.856080 \text{ mg EAG.g}^{-1}$ de matéria fresca na primavera (Figura 02).

Figura 02. Teores de compostos fenólicos em mudas de alface segundo as estações do ano. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si.



As mudas produzidas na primavera apresentaram o maior teor de compostos fenólicos, alcançando médias de, aproximadamente, 18 mg EAG.g^{-1} de matéria fresca, indicando superioridade

em relação às demais estações. Nas mudas do inverno o teor médio foi significativamente inferior à primavera, mas superior ao verão. No outono o teor de compostos fenólicos totais não diferiu estatisticamente do inverno e do verão. Por fim, no verão os menor teor médio de compostos fenólicos totais foi observado, aproximadamente $6 \text{ mg EAG}\cdot\text{g}^{-1}$, sendo significativamente inferior às demais estações.

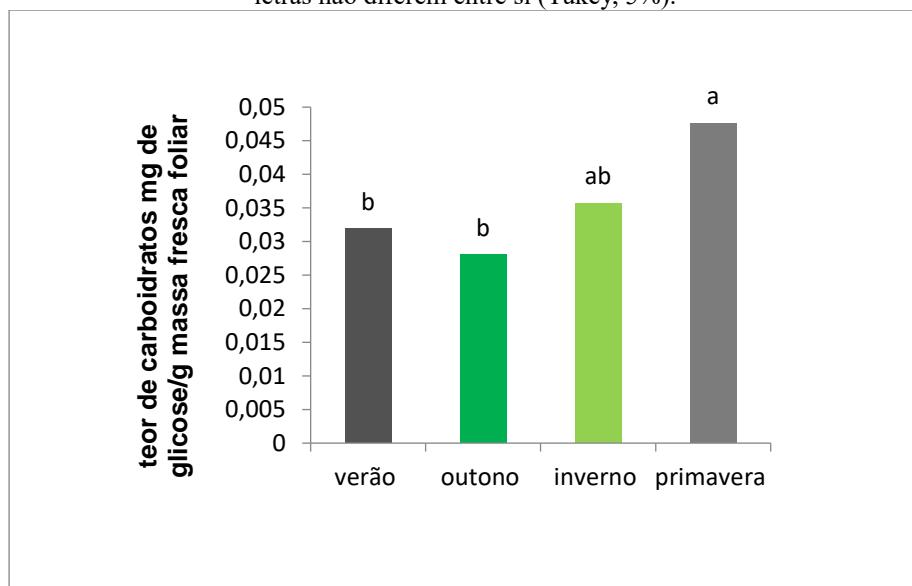
As variações sazonais, como mudanças na temperatura, intensidade de luz e umidade, afetam diretamente a produção de compostos fenólicos, resultando em diferentes teores nas folhas da alface SOUZA (2023). Os baixos teores verificados no verão podem estar associados às condições de temperaturas elevadas e alta radiação solar, que aumenta o nível do estresse oxidativo nas plantas. ARBOS et al. (2010) afirmam que o aumento da temperatura no verão pode causar danos aos tecidos das mudas, e levar à inibição da produção de compostos fenólicos, já que o objetivo metabólico da planta está voltado para a sobrevivência em condições adversas. NEGRÃO (2021) também destaca que, sob calor extremo, a manutenção da hidratação é priorizada, o que pode afetar a biossíntese de compostos antioxidantes como os compostos fenólicos.

No experimento de inverno o teor de compostos fenólicos aumentou e isto pode ser atribuído ao fato de que, em condições de frio, as plantas produzem mais compostos fenólicos para se defender de possíveis danos causados pelo estresse térmico. Segundo RAY et al. (2024), as temperaturas mais baixas induzem a ativação de vias biosintéticas ligadas à defesa antioxidante, resultando em maior produção de fenólicos. ARBOS et al. (2010) acrescentam que, durante o inverno, as plantas ajustam seu metabolismo para lidar com temperaturas mais baixas, o que inclui o aumento na produção de substâncias que ajudam na manutenção da integridade celular. Conforme SANTOS et. al. (2019), a temperatura baixa é um dos fatores que induzem a produção de compostos fenólicos.

Foi possível observar um maior teor de compostos fenólicos no experimento na primavera. Segundo ARBOS et al. (2010), o aumento da radiação solar e as mudanças na temperatura podem induzir a produção de antioxidantes, incluindo os compostos fenólicos, como forma de proteger os tecidos vegetais contra o aumento de radicais livres. Negrão (2021) afirma que essa fase de crescimento acelerado nas mudas de alface está diretamente relacionada à maior produção de metabólicos secundários, sendo os fenólicos um dos principais compostos envolvidos. Ainda de acordo com o estudo do autor no qual foi analisada a composição fenólica de diferentes hortaliças consumidas no Brasil, incluindo leguminosas e vegetais, a alface apresentou um dos maiores teores de compostos fenólicos entre as plantas analisadas. Assim, a produção de compostos fenólicos nas mudas será influenciada pelas condições ambientais características das estações do ano.

Os resultados demonstram variações significativas nos teores de carboidratos (mg de glicose/g de massa fresca foliar) em função da época de produção (Figura 03). Na primavera houve maior acúmulo de carboidratos, com média de 0,0476 mg de glicose/g de massa fresca foliar. No inverno a média de teor de carboidratos foi de 0,0357 mg de glicose/g de massa fresca foliar, não deferindo estatisticamente das demais épocas de produção. Nas produções de verão (0,0319 mg de glicose/g de massa fresca foliar) e a outono (0,0280 mg de glicose/g de massa fresca foliar) os teores foram estatisticamente similares entre si e significativamente inferiores ao teor médio observado na primavera.

Figura 03. Teores de carboidrato em mudas de alface em função da estação de produção. Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si (Tukey, 5%).



Estas variações nos teores de carboidratos podem estar ligadas a mudanças sazonais nos fatores ambientais que afetam o metabolismo das plantas, como luz, temperatura e disponibilidade hídrica. O aumento da radiação solar e da temperatura na primavera promove maior taxa de fotossíntese, o que explica o maior acúmulo de carboidratos. A alta atividade fotossintética resulta em maior produção de glicose, que é armazenada nas folhas na forma de carboidratos solúveis. Apesar das temperaturas mais baixas no inverno, as plantas podem acumular carboidratos como uma forma de adaptação ao estresse térmico. No inverno, o metabolismo é reduzido, mas há maior tendência para a alocação de carboidratos em órgãos de armazenamento (ZHANG et al., 2020; ROSA et al., 2021).

De acordo com LARCHER (2003), o acúmulo de carboidratos é fundamental para a sobrevivência das plantas em condições adversas. Embora o verão ofereça uma alta incidência de luz solar, observou-se que as plantas acumularam menos carboidratos nessa estação em comparação com

a primavera. Essa diferença pode estar associada ao estresse térmico causado pelas temperaturas mais elevadas no verão, que afetam negativamente a capacidade das plantas de armazenar carboidratos.

Em condições de calor extremo, as plantas enfrentam dificuldades para manter a eficiência fotossintética devido à maior transpiração e ao fechamento estomático, o que limita a absorção de CO₂. Segundo TAIZ E ZEIGER (2017), a produção de carboidratos é reduzida pelo estresse térmico que afeta a atividade enzimática envolvida na fotossíntese, o que explica os menores níveis de carboidratos no verão. Entretanto, os resultados demonstram que no outono, a redução da atividade fotossintética, devido à diminuição da luz e da temperatura.

A temperatura mencionada no outono refere-se à redução da intensidade e da duração da luz solar, assim como há queda gradual das temperaturas à medida que o clima se torna mais ameno. Essas condições afetam diretamente a atividade fotossintética das plantas. Com menos luz disponível, o processo de fotossíntese é reduzido, já que as plantas dependem da luz solar para converter dióxido de carbono e água em glicose (carboidrato) e oxigênio. Além disso, temperaturas mais baixas podem diminuir a eficiência das enzimas envolvidas na fotossíntese, desacelerando o metabolismo da planta TAIZ E ZEIGER (2017).

No estudo realizado por CARVALHO (2015) foram mensuradas as concentrações médias de açúcares redutores (glicose e frutose) e não redutores (sacarose) nas folhas de plantas de melão submetidas a diferentes regimes de temperatura. As médias obtidas indicaram que as plantas submetidas a temperaturas mais elevadas apresentaram concentrações médias de glicose de aproximadamente 3,5 mg/g de matéria fresca, enquanto aquelas em temperaturas mais baixas tiveram médias em torno de 2,1 mg/g de matéria fresca e as concentrações médias de frutose, de maneira similar, foram mais altas em plantas sob temperaturas elevadas, atingindo cerca de 4,0 mg/g de matéria fresca, comparadas a 2,3 mg/g de matéria fresca nas condições de temperatura mais amena.

A sacarose em relação aos açúcares não redutores, mostrou uma resposta inversa, com concentrações médias mais elevadas em plantas sob temperaturas mais baixas, em torno de 5,2 mg/g de matéria fresca, enquanto que sob temperaturas mais elevadas, essa média foi de 3,8 mg/g de matéria fresca.

Os dados de CARVALHO (2015) corroboram com os achados desta pesquisa onde mostram como as temperaturas afetam o acúmulo de açúcares, enquanto reflete os carboidratos totais nas folhas ao longo das estações. Ambos os estudos sugerem que condições climáticas influenciam fortemente o acúmulo de carboidratos nas plantas, com valores mais altos em estações ou condições de temperaturas elevadas (como no verão e na primavera).

Segundo QIN et al. (2020), em estudo com alface, foram identificadas proteínas (cinase MAK, a cinase caseína, a trealose-6-fosfato e a cinase de proteína TOR) relacionadas ao metabolismo da sacarose sob temperaturas altas que foram significativamente aumentadas e os teores de açúcares solúveis. As proteínas sofreram alterações durante o pendoamento sob altas temperaturas nas folhas de alface.

As variações sazonais do microclima no interior da estufa influenciaram a qualidade das mudas de alface levando a alterações da síntese de compostos indicadores de estresse como prolina, compostos fenólicos e produtos resultantes da peroxidação lipídica. Em função do calor excessivo, a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) favoreceu o aumento da peroxidação lipídica nas plantas no verão e no outono.

4 CONCLUSÕES

O maior teor de compostos fenólicos foi encontrado na estação da primavera onde foi observado um equilíbrio ideal entre o período com temperatura mínima de 17,2°C e boa luminosidade criando condições favoráveis para o metabolismo das plantas, no entanto no verão o teor de compostos fenólicos foi relativamente baixo. Esse resultado pode ser explicado pelas condições de temperaturas elevadas e alta radiação solar, levando a um aumento no nível do estresse oxidativo nas plantas.

O teor de carboidratos ao longo das variações de temperatura apresentou maior média na primavera e menor acúmulo no outono, indicando que nessas épocas de produção há menor impacto sobre a atividade fotossintética.

Dos metabólicos estudados a variável peroxidação lipídica foi a que apresentou interação significativa entre os fatores grupos de alface e estações do ano.

Das cultivares estudadas (lisa, crespa e americana) a alface lisa apresentou o valor mais alto de MDA/g durante o verão, com isso pode-se concluir que a alface lisa é mais suscetível ao estresse oxidativo causado pelas altas temperaturas e pela radiação solar intensa nessa estação. Já a alface Americana é mais sensível no outono, enquanto a alface do grupo Crespa apresentou maior capacidade de tolerância às condições indutoras de peroxidação lipídica.

A qualidade das mudas de alface é afetada pelas condições microclimáticas no interior da estufa em função da época de produção. As mudas apresentam alterações nos teores de metabólitos indicadores de estresses abióticos e tais estados metabólicos podem influenciar o desempenho das mudas após o transplantio.

REFERÊNCIAS

- Albalasmeh, A. A., Berhe, A. A., Ghezzehei, T. A (2013) A new method for rapid determination of carbohydrate and total carbon concentrations using UV spectrophotometry. *Carbohyd Polymers*, v.97, p. 253-261, Life and Environmental Sciences, University of California, Merced, United States.
- Almeida, E.J. (2018) Ecofisiologia de Hortaliças. In P.T. João (org), *Ecofisiologia de culturas agrícola*. 1^a Edição. cap. 4, p. 53- UEMG.
- Arbos, K.. A., Freitas, R. J. S., Stertz, S. C., & Dornas, M. F. (2010) Atividade antioxidante e teor de fenólicos totais em hortaliças orgânicas e convencionais. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 30, p 501-506.
- Ashraf, M.; Foolad, M.R. (2007) Papéis da Glicina Betaína e Prolina na Melhoria da Resistência ao Estresse Abiótico de Plantas. *Environmental and Experimental Botany*, 59, 206-216.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>.
- Bates L. S. (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, v.39, p. 205-207.
- Carvalho, C.A.C., (2015) Impacto do estresse térmico e de CO₂ no crescimento inicial e fisiologia do meloeiro. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Mossoró-RN Universidade Federal Rural do Semiárido-UFRSA, 56p.
- Carvalho, L.M., Araújo, S.B., Carvalho, H.W.L., Carvalho, C.G.P., (2018) Proline Content of Sunflower Cultivars in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53. n 8, p 970-973.
- Davenport, S.B.; Gallego, S.M.; Benavides, M.P.; Tomaro, M.L. (2003) Behaviour of antioxidant defense system in the adaptative response to salt stress in *Helianthus annuus* L. cells. Departamento de Química Biológica, Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad de Buenos Aires. *Plant Growth Regul.* V 40. p 81-88.
- Furlan, R.A. Folegatti, M.V. (2002) Distribuição vertical e horizontal de temperaturas do ar em ambientes protegidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.6, n.1, p. 93- 100.
- Hassan, M.U.; Chattha, M.U.; Khan,I.; Chattha, M.B.; Barbanti, L.; Aamer,M.; Iqbal, M.M.; Nawaz, M.; Mahmood, A.; Ali, A.; Aslam, M.T. (2021) Heat stress in cultivated plants: nature, impact, mechanisms, and mitigation strategies – a review. *Plant Biosyst*. V155. p 211-234.
- IBGE. (2017) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html>.
- Larcher, W. (2003) *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: Rima Artes e Textos.
- Lima, M.S. S (2018) Índices morfológicos de alface, produzidas em diferentes substratos em ambiente protegido. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Paragominas, Paragominas, 37p.

Misra, N; Gupta, A. (2006). Effect of salinity and different nitrogen sources on the activity of antioxidant enzymes and indole alkaloid content in *Catharanthus roseus* seedlings. *Journal of Plant Physiology*, v. 162, n. 1, p. 54-64.

Mittler, R. (2002) Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance in plants. *Trends in Plant Science*, v. 7, n.9, p. 405-410. doi:10.1016/S1360-1385(02)02312-9.

Mittler, R.; Finka, A.; Goloubino, F.F.P. (2012) How do plants feel heat? *Trends Biochem Sci*, v.37, n.3, p.118-125.

Negrão, L.D., Sousa, P.V.L., Barradas, A.M., Brandão, A.C.A.S., Araujo, M.A.M., Araujo, R.S.R.M. (2021) Bioactive compounds and antioxidant activity of crisphead lettuce (*Lactuca sativa* L.) of three different cultivation systems. *Food Sci. Technol*, v.41, n.2, p.365-370.

Oliveira, W. A. S. (2022). Impacto das condições ambientais no estresse oxidativo das plantas: uma análise de cultivares de alface. *Journal of Plant Stress Physiology*, v. 45, n.1, p. 102-112.

Qin X, Li P, Lu S, Sun Y, Meng Li, Hão J. Fan Shuangxi (2020) Phosphoproteomic analysis of lettuce (*Lactuca sativa* L.) reveals starch and sucrose metabolism functions during bolting induced by high temperature. *PLoS ONE –China*, v. 15, n. 12, p. 0244198.

Ray, A. Kundu, S. Mohapatra, S.S, Sinha, S. Khoshru, B. Keswani, C. Mitra, D. (2024) Uma visão sobre o papel dos fenólicos na tolerância ao estresse abiótico em plantas: perspectiva atual para um ambiente sustentável. *J Pure Appl Microbiol*. V.18, n.1, p.64-79. doi: 10.22207/JPAM.18.1.09.

Rebouças, P.M.; Dias, I.F.; Alves, M.A., Barbosa, F F. J.A.D (2015) Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido. *Revista Agrogeo ambiental*, v.7, n.2, p. 115-125.

Resende, M.D.L (2006) Alterações fisiológicas e bioquímicas durante a germinação de sementes de café (*Coffea arabica* L.) CV. Rubi. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – UFLA, 119p.

Rosa, M., Prado, C., Podazza, G., Interdonato, R., González, J. A., Hilal, M., & Prado, F. E. (2021) Carbohydrate metabolism in plants under drought stress. In *Plant Metabolites and Regulation Under Environmental Stress*. p.143-162. Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-817955-5.00007-8.

Santos, A.P (2016) Características agronômicas e qualidade da alface (*Lactuca sativa* L.) sob fertilização orgânica e mineral. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade de Brasília–DF,114p.

Santos, M. (2021) Produção de biofertilizantes e sua influencia na produção de mudas de alface. Universidade do Estado da Bahia-UNEB departamento de ciências humanas- Campos-IX.

Silva, E.T. Byllardt, L.V.B. Gomes, S. Wolf, G.D. (2003) Comportamento da temperatura do ar sob condições de cultivo em ambiente protegido. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, v.1, n.1, p. 51-54.

Souza, A.S.N. (2023) Influência da cultivar e da estação do ano (inverno e verão) em compostos bioativos em quatro cultivares de alface vermelha (*Lactuca sativa* L.). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de

Ciência e Tecnologia de Alimentos, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Porto Alegre, 138p.

Taiz, L.; Zeiger, E. (2017) Fisiologia vegetal. 5^a ed. Porto alegre: Artmed, Cap 7, 14, 918p.

Zandonadi, F. (2022) O cinturão verde que alimenta o Rio de Janeiro. Conexão safra. Disponível em: <https://conexaosafra.com/agro-rio-de-janeiro/o-cinturao-verde-que-alimenta-o-rio-de-janeiro/> Acesso em 24 de agosto de 2023.

Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Liu, P., & Qin, Z. (2020) Adaptation of plants to environmental stress through carbohydrate metabolism reprogramming. Current Opinion in Plant Biology, v. 55, p. 101-106. doi:10.1016/j.pbi.2020.04.006.

Zhou, W.; Liang, X.; Li, K.; Dai, P.; Li, J.; Liang, B.; Sun, C.; Lin, X. (2021) Metabolomics analysis reveals potential mechanisms of phenolic accumulation in lettuce (*Lactuca sativa L.*) induced by low nitrogen supply. Plant Physiol Biochem, v 158 p 446-453.