



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

RICARDO FALESI PALHA DE MORAES BITTENCOURT

**CULTIVO HIDROPÔNICO DE ALFACE EM CONDIÇÃO DE ELEVADA
TEMPERATURA: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CULTIVARES E
SUPLEMENTAÇÃO COM MAGNÉSIO**

BELÉM

2022

RICARDO FALESI PALHA DE MORAES BITTENCOURT

**CULTIVO HIDROPÔNICO DE ALFACE EM CONDIÇÃO DE ELEVADA
TEMPERATURA: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CULTIVARES E
SUPLEMENTAÇÃO COM MAGNÉSIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia: área de concentração Nutrição Mineral de Plantas e Fertilidade do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior

BELÉM

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B624c Bittencourt, Ricardo Falesi Palha de Moraes
Cultivo hidropônico de alface em condição de elevada temperatura: avaliação do desempenho de cultivares esuplementação com magnésio / Ricardo Falesi Palha de Moraes Bittencourt. - 2022.
78 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Agronomia (PPGA), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2022.
Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior
1. Nutrição Mineral de Plantas. 2. Hidroponia. 3. Fisiologia Vegetal. 4. Produção Vegetal. I. Silva Júnior, Mário Lopes da, orient. II. Título

CDD 631.585

RICARDO FALESI PALHA DE MORAES BITTENCOURT

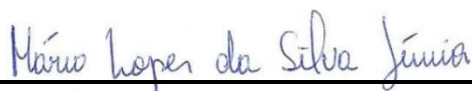
**CULTIVO HIDROPÔNICO DE ALFACE EM CONDIÇÃO DE ELEVADA
TEMPERATURA: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CULTIVARES E
SUPLEMENTAÇÃO COM MAGNÉSIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação em Agronomia para a obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas.

Orientador: Prof^o Dr^o. Mário Lopes da Silva Júnior

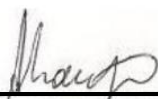
Data da Aprovação: 30/06/2022

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior - Presidente

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA



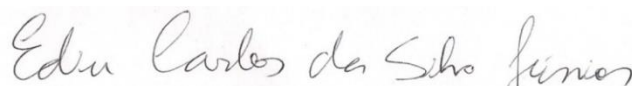
Prof^a. Dr^a. Ana Regina da Rocha Araújo – 1^o Examinador

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA

Hozano de Souza Lemos Neto
Assinado de forma digital por
Hozano de Souza Lemos Neto
Dados: 2022.07.30 14:54:18 -03'00'

Prof. Dr. Hozano de Souza Lemos Neto – 2^o Examinador

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ – UFPI



Dr. Ediu Carlos da Silva Júnior – 3^o Examinador

INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE - ITV

DEDICO

À minha esposa, Erika da Silva Chagas, por todo o apoio, dedicação, paciência e amor incondicional, que me sustentam nos momentos de maior dificuldade e me fazem superar quaisquer desafios.

Aos meus pais, Ruth Helena Falesi Palha de Moraes Bittencourt e Cláudio Palha de Moraes Bittencourt Filho, pelos sacrifícios, incentivos, ensinamentos repassados e por serem meus exemplos de caráter, humildade e dedicação.

Aos meus irmãos Italo Cláudio Falesi Palha de Moraes Bittencourt e Leonardo Falesi Palha de Moraes Bittencourt pela parceria, amizade e momentos de felicidade.

Aos meus avós, Cláudio Palha de Moraes Bittencourt (*in memoriam*), Graça Palha de Moraes Bittencourt, Ruth Dias Falesi (*in memoriam*) e em especial, Italo Cláudio Falesi, por todas as conversas, ensinamentos e incentivos desde o início de minha trajetória.

Aos amigos e demais familiares, por todo o apoio durante os momentos de minha vida.

OFEREÇO

À Tinho, Ruth Dias Falesi (*in memoriam*), minha avó e madrinha, por todo o cuidado, amor, ensinamentos e memórias.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela força, amor, família, amigos e principalmente pelos desafios.

À Universidade Federal Rural da Amazônia e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia PGAGRO, e a todos os profissionais da instituição pelas experiências e conhecimentos repassados durante o curso, que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mário Lopes da Silva Júnior pela oportunidade, amizade, apoio e confiança depositados desde os tempos de graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Laboratório de Fisiologia Vegetal e a todos os membros do grupo de pesquisa de Estudos da Biodiversidade de Plantas Superiores – EBPS, coordenado pelo Prof. Dr. Cândido Ferreira Neto, por todo o suporte e presteza durante as análises bioquímicas.

Ao Laboratório de Nutrição Animal – LABNUTAN nome do Prof. Dr. Fernando Barbosa, pelo suporte durante as análises.

Aos meus pais Ruth Helena Falesi Palha de Moraes Bittencourt e Cláudio Palha de Moraes Bittencourt Filho, e irmãos Italo Falesi Bittencourt e Leonardo Falesi Bittencourt os quais foram primordiais para o desenvolvimento e conclusão deste projeto, sempre me apoiando e incentivando mesmo nas situações mais adversas. Ao meu avô, Italo Cláudio Falesi, por ser meu espelho de profissionalismo na área agrônômica e científica, bem como exemplo de caráter e princípios. À minha avó Ruth Dias Falesi e meu avô Cláudio Palha de Moraes Bittencourt, pelos exemplos de simplicidade, honestidade e bondade. Aos demais componentes da minha família, por todo apoio e carinho.

À minha esposa, Erika da Silva Chagas, pelos momentos de amor, apoio, dedicação e paciência, os quais me fazem sempre almejar o melhor da vida. Te agradeço por ser meu porto seguro, me impulsionando e direcionando independentemente do tamanho do desafio.

Ao amigo Dr. Italo Sampaio, pela amizade, parceria, ensinamentos, apoio e exemplo de profissionalismo e humanidade.

Ao meu amigo de infância, Gabriel Sena, e aos amigos de curso de agronomia, Rodolfo Daniel, Wenderson Nonato e aos demais companheiros da turma Agro-B 2015.

Aos companheiros dos laboratórios de Microbiologia do Solo e do laboratório de Análise de Plantas, Victor Dias, Jonathan Marques, Stefany Figueiredo, Alyam Dias, Renan Marques e Andrei por todo o apoio, vocês foram fundamentais para a execução deste projeto.

Aos colegas de Pós-Graduação, Julliane Silva, Yan Dias, Priscila Modesto, Vivian Christine, Dandara Lima, Eder Oliveira, Maynara Gomes e Ana Renata Abreu, pela amizade e ensinamentos durante minha trajetória no programa.

E a todos aqueles que auxiliaram direta e indiretamente para minha formação.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: DESEMPENHO PRODUTIVO, FISIOLÓGICO E QUALITATIVO DE CULTIVARES DE ALFACE HIDROPÔNICA SOB CONDIÇÃO DE ELEVADA TEMPERATURA.

Figura 1 – Temperatura no interior da casa de vegetação durante o experimento.

Figura 2 – Disposição dos vasos nas bancadas no interior da casa de vegetação.

Figura 3 – Teor de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides em cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico sob condição de temperatura elevada.

Figura 4 – Análise de agrupamento “cluster” dos cultivares de alface cultivadas em hidroponia sob elevada temperatura.

CAPÍTULO 2: CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO AFETA A PRODUÇÃO, DESEMPENHO FISIOLÓGICO E BIOQUÍMICO EM CULTIVARES DE ALFACE CULTIVADAS EM CONDIÇÃO DE ELEVADAS TEMPERATURAS.

Figura 5 – Médias de temperatura no interior da casa de vegetação durante o experimento.

Figura 6 – Sistema de cultivo das alfaces.

Figura 7 – Atividade das enzimas catalase CAT (**A**) e peroxidase do guaiacol GPX (**B**) e extravasamento de eletrólitos das folhas (**C**) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1%, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão.

Figura 8 – Teor de clorofila a (**A**), clorofila b (**B**) e carotenoides (**C**) em cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1%, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão.

Figura 9 – Fotossíntese líquida – Pn (**A**), transpiração – E (**B**), condutância estomática – gs (**C**), carbono intercelular - Ci (**D**), eficiência de carboxilação – Pn/Ci (**E**) e eficiência de uso de água – WUE (**F**) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1%, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão

Figura 10 – Altura - H (**A**), Diâmetro do caule - D (**B**), comprimento da raiz principal - CRP (**C**) e número de folhas - NF (**D**) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1% respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão

Figura 11 – Aspecto visual das cultivares de alface Olinda (à direita) e Mônica (à esquerda) nas concentrações de 0,01 (**A**), 0,5 (**B**), 1,0 (**C**), 2,0 (**D**) e 4,0 mmol de Mg L⁻¹ (**E**) na solução nutritiva.

Figura 12 – Massas frescas de folhas - MFF (**A**), caule - MFC (**B**), raiz - MFR (**C**) e massas secas de folhas -MSF (**D**), caule - MSC (**E**) e raiz – MSR (**F**) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “**” indicam significância do teste t a 5% e 1% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão.

Figura 13 – Potencial hidrogeniônico - pH (**A**), sólidos solúveis totais - SST (**B**), Acidez titulável - AT (**C**) e relação SST/AT (**D**) de folhas de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “**” indicam significância do teste t a 5% e 1% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1: DESEMPENHO PRODUTIVO, FISIOLÓGICO E QUALITATIVO DE CULTIVARES DE ALFACE HIDROPÔNICA SOB CONDIÇÃO DE ELEVADA TEMPERATURA.

Tabela 1 – Médias de Altura - H (cm^{-1}), diâmetro - D (mm^{-1}), número de folhas - NF , área foliar (cm^2), incidência de pendoamento (%) – IP , grau de pendoamento – GP e idade até o início do florescimento – FS , obtidos da avaliação de nove cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico sob condição de elevada temperatura.

Tabela 2 – Acúmulo de biomassa fresca e seca de folhas, caule e raízes obtidos da avaliação de nove cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico em condição de elevada temperatura.

Tabela 3 – Médias de fotossíntese líquida – Pn , condutância estomática – gs , transpiração – E , taxa de carbono interno – Ci , temperatura da folha – TF e eficiência de uso da água – WUE (obtida pela razão entre Pn e E), de cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônica sob condição de elevada temperatura.

Tabela 4 – Teor de ácido ascórbico (AA), pH do extrato foliar (pH), sólidos solúveis totais (SST), acidez titulável (AT) e relação de sólidos solúveis e acidez titulável (SST/AT) obtidos da avaliação de folhas de alface cultivadas em sistema hidropônico sob condição de temperatura elevada

CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO AFETA A PRODUÇÃO, DESEMPENHO FISIOLÓGICO E BIOQUÍMICO EM CULTIVARES DE ALFACE CULTIVADAS EM CONDIÇÃO DE ELEVADAS TEMPERATURAS

Tabela 5 – Soluções estoque utilizadas (ml L^{-1}) para compor as soluções nutritivas contendo níveis variados de magnésio.

RESUMO

A alface (*Lactuca sativa*) é a hortaliça folhosa mais comercializada no mundo, tendo seu consumo predominantemente na forma “*in natura*”, sendo o tipo crespa a mais comercializada no Brasil. Contudo, a alface é oriunda de climas temperados, apresentando algumas limitações quando cultivada em regiões com temperaturas superiores à 28 °C, ficando susceptível a expressar pendoamento precoce, o qual prejudica a produção e qualidade dessa folhosa. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de cultivares de alface crespa em sistema hidropônico sob condição de temperatura elevada, e em diferentes concentrações de magnésio (Mg) na solução nutritiva. Para tal, foram realizados dois ensaios com delineamento inteiramente casualizado. O primeiro ensaio avaliou o desempenho produtivo, fisiológico e de qualidade pós-colheita de nove cultivares de alface crespa. O segundo ensaio avaliou o efeito das concentrações de 0,01, 0,5, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹ na atividade de enzimas antioxidantes, extravasamento de eletrólitos das folhas, desempenho fisiológico, crescimento, produção e qualidade pós colheita de duas cultivares de alface (Olinda e Mônica), uma tolerante e outra susceptível a condição de temperatura elevada. As cultivares Olinda e Cristina foram as que expressaram melhor desempenho produtivo, além de apresentarem tolerância ao pendoamento precoce. Destacamos ainda as diferenças entre as cultivares Olinda e Cristina, as quais atendem dois mercados distintos na alfavicultura. A cultivar Olinda atende à demanda de mercado de alimentos funcionais, por apresentar elevado teor de compostos antioxidantes, enquanto a cultivar Cristina, atende o mercado tradicional brasileiro, que consome alfaces crespas com coloração verde clara. Observamos ainda dentre os materiais testados a cultivar Mônica como a mais susceptível ao pendoamento em regiões de climas quentes. Quanto aos efeitos das concentrações de Mg, observamos que a concentrações ótimas de Mg na cultivar Mônica, reduziu as perdas produtivas e de pós-colheita, contudo não foi suficiente para mitigar a expressão do pendoamento precoce. Ainda, o Mg promoveu melhorias na capacidade de resposta antioxidante, desempenho fotossintético, crescimento e produção das cultivares de alface, com concentrações críticas estimadas de 2,44 mmol L⁻¹ e 2,92 mmol L⁻¹, respectivamente para as cultivares Olinda e Mônica.

Palavras-chave: Magnésio; Pendoamento precoce; Produção; Qualidade pós-colheita; Hidroponia.

ABSTRACT

The lettuce (*Lactuca sativa*) is the most commercialized leafy vegetable in the world, having its consumption predominantly in the form "in natura", being the crisp type the most commercialized in Brazil. However, lettuce comes from temperate climates, presenting some limitations when cultivated in regions with temperatures above 28 °C, being susceptible to express early bolting, which affects the production and quality of this leafy vegetable. In this sense, this work aimed to evaluate the performance of cultivars of crisp lettuce in hydroponic system under high temperature conditions, and in different magnesium (Mg) concentrations in the nutrient solution. To this end, two trials were conducted in an entirely randomized design. The first trial evaluated the productive, physiological and postharvest quality performance of nine cultivars of crisp lettuce. The second trial evaluated the effect of concentrations of 0.01, 0.5, 1, 2 and 4 mmol L⁻¹ on antioxidant enzyme activity, electrolyte leakage from leaves, physiological performance, growth, yield and postharvest quality of two lettuce cultivars (Olinda and Monica), one tolerant and the other sensitive to high temperature conditions. The cultivars Olinda and Cristina expressed the best productive performance, besides presenting tolerance to early bolting. We also highlight the differences between the cultivars Olinda and Cristina, which serve two distinct markets in alfaculture. The cultivar Olinda serves the functional food market demand, for presenting a high content of antioxidant compounds, while the cultivar Cristina attends the traditional Brazilian market, which consumes crisp lettuce with a light green color. We also observed that among the materials tested, the variety Mônica was the most susceptible to bolting in regions with hot climates. Regarding the effects of Mg concentrations, we observed that the optimal concentrations of Mg in the cultivar Mônica reduced the productive and postharvest losses, however, it was not enough to mitigate the expression of early bolting. Yet, Mg promoted improvements in antioxidant responsiveness, photosynthetic performance, growth and production of lettuce cultivars, with estimated critical concentrations of 2.44 mmol L⁻¹ and 2.92 mmol L⁻¹, respectively for Olinda and Monica cultivars.

Keywords: Magnesium fertilization; Early bolting; Production; Postharvest quality; Hydroponics.

SUMÁRIO

CONTEXTUALIZAÇÃO -----	14
Estresse por calor -----	14
Mecanismos vegetais de atenuação do estresse por calor -----	15
A cultura da alface -----	16
Estresse por calor na alface -----	17
O papel do magnésio na mitigação do estresse térmico -----	18
Cultivo hidropônico -----	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	19
DESEMPENHO PRODUTIVO, FISIOLÓGICO E QUALITATIVO DE CULTIVARES DE ALFACE HIDROPÔNICA SOB CONDIÇÃO DE ELEVADA TEMPERATURA	24
INTRODUÇÃO -----	26
MATERIAL E MÉTODOS -----	27
RESULTADOS -----	32
DISCUSSÃO -----	39
CONCLUSÃO -----	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	46
CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO AFETA A PRODUÇÃO, DESEMPENHO FISIOLÓGICO E BIOQUÍMICO EM CULTIVARES DE ALFACE CULTIVADAS EM CONDIÇÃO DE ELEVADAS TEMPERATURAS -----	49
INTRODUÇÃO -----	53
MATERIAIS E MÉTODOS -----	54
RESULTADOS -----	60
DISCUSSÃO -----	69
CONCLUSÃO -----	75
CONCLUSÕES GERAIS -----	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	76

CONTEXTUALIZAÇÃO

Estresse por calor

A elevação da temperatura ao redor do mundo impacta diversos processos chave no metabolismo das plantas, postulando como um dos principais fatores limitantes da produção vegetal (PESSARAKLI, 2014; FAHAD et al., 2017; SIDDIQUI et al., 2018), sobretudo para as espécies alimentícias termossensíveis. Nesta condição, a incidência de estresse por calor deverá se tornar ainda mais recorrente (IPCC, 2013).

O estresse por calor é caracterizado quando observado redução no crescimento e desenvolvimento das plantas em função da elevação da temperatura a níveis acima dos tolerados pela cultura (WAHID et al., 2007). Tal estresse afeta geralmente a eficiência fotossintética e a fenologia das culturas, reduzindo a duração de seu ciclo e, conseqüentemente, reduzindo a produtividade e qualidade destas (HATFIELD; PRUEGER, 2015; FAHAD et al., 2017; SHARMA et al., 2020). Nestas condições é comumente reportada a redução da atividade fotossintética das plantas, acompanhadas de decréscimo de produção (HASANUZZAMAN et al., 2013; DOĞRU, 2021).

O decréscimo da produção em virtude desse estresse se dá em função da redução da atividade enzimática (em função da desnaturação de proteínas), o que impacta diretamente processos como a fotossíntese, absorção e assimilação iônica, acúmulo de biomassa e respiração (MENGUTAY et al., 2013; GIRI et al., 2017; SIDDIQUI et al., 2018). A redução da atividade fotossintética acaba afetada em função do declínio do PSII e da inibição do transporte de elétrons, biossíntese das clorofilas e cloroplastos nas plantas (DUTTA; MOHANTY; TRIPATHY, 2009; CHEN et al., 2012).

De acordo com Marutani et al., (2012), o estresse por calor resulta em uma exposição dos cloroplastos a grandes quantidades de energia, as quais agem como um gatilho para a síntese exacerbada de espécies reativas de oxigênio (ERO). Ainda de acordo com este autor, os radicais superóxido (O_2^-), hidroxila (OH^-) e oxigênio singlete (1O_2), o composto peróxido de hidrogênio (H_2O_2), são considerados como ERO.

As ERO são produtos naturais do metabolismo vegetal, e em concentrações normais, atuam como sinalizadores moleculares, elevando sua resistência a estresses abióticos e atuando na aclimação das plantas sob estímulos ambientais (SINGH et al., 2019; HASANUZZAMAN et al., 2020).

Contudo, sob influência de calor em grau acima do tolerável pelas culturas, são gerados desbalanços metabólicos, levando a uma super produção das ERO, as quais, por sua vez

resultam no estresse oxidativo (KUMAR TEWARI et al., 2006; MENGUTAY et al., 2013; SIDDIQUI et al., 2018). O estresse oxidativo desencadeia disfunções na atividade dos cloroplastos, inibição da síntese de clorofila, desnaturação de enzimas e ocasionando danos celulares (CHEN et al., 2012; SIDDIQUI et al., 2015; SIDDIQUI et al., 2018), podendo ainda, causar a expressão de genes de estresse térmico, os quais podem alterar a duração do ciclo das plantas e conseqüentemente, sua produção e qualidade (LIU et al., 2020).

Mecanismos vegetais de atenuação do estresse por calor

Durante seu ciclo de vida, todos os organismos vegetais enfrentam condições ambientais estressantes, contudo, diferentemente dos animais, as plantas são incapazes de se deslocar e escapar do ambiente estressante, o que fez com que estas desenvolvessem mecanismos de tolerância a estresses para garantir sua sobrevivência (SINGH et al., 2019). Para ativar estes mecanismos, plantas fazem uso de compostos sinalizadores.

Dentre os compostos sinalizadores, destacam-se as ERO (HASANUZZAMAN et al., 2020). Porém, sob condições de estresse, o balanço de produção e eliminação de ERO nas plantas é afetado, gerando acumulação destas nos tecidos vegetais (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011). Nestas condições a presença das ERO pode vir a se tornar nociva, desencadeando o estresse oxidativo. Para evitar tais problemas, plantas fazem uso de um sistema de defesa antioxidante, o qual é composto por complexos enzimáticos e não enzimáticos e, atuam simultaneamente de forma sinérgica (BARBOSA et al., 2014; HUANG et al., 2019).

Os complexos não enzimáticos estão relacionados a compostos antioxidantes de baixa massa molecular, como é o caso do ácido ascórbico, flavonoides (HUANG et al., 2019). Neste grupo, tem sido destacado também o papel das clorofilas e dos carotenoides, sobretudo em relação a inibição da peroxidação lipídica (LANFER-MARQUEZ et al., 2005; KARUPPANAPANDIAN et al., 2011; ANTONIO & VIERA, 2020).

Já os complexos enzimáticos, tal qual sugere o nome, é composta por ação de enzimas que realizam a desintoxicação celular (BARBOSA et al., 2014). Dentre estas enzimas, destacam-se a atividade da catalase - CAT, superóxido dismutase - SOD, ascorbato peroxidase – APX, peroxidase do guaicol – G-POD e glutathiona peroxidase – GPX (APEL & HIRT, 2004).

Estes complexos atuam à nível bioquímico e impactam o funcionamento fisiológico da planta em condições de estresse. Para identificar a condição o desempenho fisiológico da planta são comumente utilizadas as análises de trocas gasosas e teor de clorofilas, uma vez que estas despontam como indicadores fisiológicos da sensibilidade das plantas á condições adversas

(OLIVEIRA et al., 2018), sendo parâmetros de importância no que tange a adaptabilidade da planta.

Estes parâmetros indicam a incidência de danos no aparato, podendo evidenciar a ocorrência de fotoinibição, limitação ou inibição da assimilação de CO₂ em função das condições ambientais as quais as plantas estão submetidas, indicando alterações na atividade fisiológica.

A cultura da alface

Pertencente à família *Asteracea*, a alface é a mais popular e economicamente relevante das hortaliças folhosas (OLIVEIRA, 2005; CHUNG et al., 2007. GUIMARÃES; MANDELLI; DA SILVA, 2011). De acordo com dados da Food and Agriculture Organization - FAO (2022), a produção de folhosas como alface e chicória (*Chicorium intybus*) atingiu ordem de 27,7 milhões de toneladas em 2020.

No Brasil o cultivo desta hortaliça predomina em sistema convencional, em solo, onde o cultivo se limita a períodos específicos no ano, sem restrição de uso de defensivos (CAMPOS, 2005; SALA; DA COSTA, 2012). Contudo, em virtude da demanda dos consumidores por alimentos de qualidade superior, o cultivo hidropônico tem ganhado espaço na alfaceicultura brasileira (SALA; DA COSTA, 2012; ROSA et al., 2014).

A alface (*Lactuca sativa*), é uma cultura de originária de clima temperado e é uma cultura de elevada importância social e econômica, sendo amplamente cultivada em todo o território nacional em virtude do melhoramento genético da espécie, com predominância de cultivares do tipo crespa (VILLAS BÔAS et al., 2004; FILGUEIRA, 2008; BATISTA et al., 2011). Em função de sua origem, a cultura da alface pode ser considerada termosensível, estando susceptível à estresses térmicos em ambientes com temperatura superiores à 28 °C (JONES, 2005; LIU et al., 2020).

Visando difundir e aprimorar a produção desta hortaliça, o melhoramento genético da alface primou pelo desenvolvimento de cultivares que apresentem maior tolerância térmica e maior tempo para floração (SILVA et al., 1999), sendo, portanto, menos susceptíveis as desordens geradas pelo estresse térmico. Dentre estas desordens, destacam-se o pendoamento precoce e a “tip-burn”, as quais provocam perda produtiva e da qualidade sensorial (HOLMES et al., 2019). O pendoamento precoce, neste sentido, ganha destaque como um dos principais fatores limitantes da produção desta hortaliça.

Outro aspecto desejável nestes programas é o incremento nos teores de clorofila, em função dos aspectos nutracêuticos e de mercado envolvidos, representando um nicho de mercado (FERRUZZI & BLAKESLEE, 2007; SILVA *et al.*, 2016). Além disto, a elevação dos teores de clorofila, confere as plantas uma maior capacidade de proteção à temperatura e luminosidade, além de melhorar a atividade fotossintética (TAIZ *et al.*, 2017). Contudo, os consumidores brasileiros tradicionalmente consomem alfaces crespas de colorações verdes mais claras (SALA; DA COSTA, 2012).

Outrora, com o desenvolvimento da cultivar Regina, houve uma predominância de alface tipo lisa na alfacultura brasileira, contudo, com a introdução da cultivar Grand Rapids, as alfaces de tipo crespa passaram a dominar o mercado brasileiro (SALA; DA COSTA, 2012). De acordo com Sala & Da Costa (2012), a alface Grand Rapids é o padrão varietal de referência das alfaces tipo crespa, com aspecto visual atraente, boa produção de folhas e crescimento rápido, além de apresentar a vantagem de ser adequada para o sistema de transporte em caixas, com o mínimo de danos as plantas.

Estresse por calor na alface

De acordo com Liu *et al.* (2020), o pendoamento precoce é induzido por genes HSP (*Heat Shock Proteins*), os quais tem sua expressão vinculada as ERO oriundas do estresse por calor. Estes por sua vez, são responsáveis pela acumulação do hormônio giberelina, o qual induz o alongamento do caule, sendo este o primeiro estágio do pendoamento.

O pendoamento resulta na redução da produção de partes comestíveis, bem como da qualidade destas, uma vez que a planta passa a priorizar o desenvolvimento do pendão floral, havendo paralização ou redução do crescimento vegetativo e translocação de açúcares das folhas para a flor. Além disto, há uma significativa redução na palatabilidade das folhas devido ao acúmulo de látex (ALBERONI, 1998), representando uma problemática para a comercialização da cultura.

Desta forma, a elevação da temperatura global desponta como um dos principais fatores limitantes a produção desta hortaliça ao redor do mundo, sobretudo em regiões de clima quente. Logo, os programas de melhoramento da alface visam prioritariamente incorporar aspectos que conferem resistência ou tolerância à doenças e questões edafoclimáticas para reduzir a incidência do pendoamento precoce em condições de clima quente (SANTOS *et al.*, 2021).

O papel do magnésio na mitigação do estresse térmico

O magnésio (Mg) é um macronutriente essencial às plantas, apresentando-se ainda como nutriente na dieta humana (MALAVOLTA, 2006; MUSSO, 2009). O Mg é absorvível pelas plantas na forma iônica e participa de processos chave dentro do metabolismo vegetal, onde destaca-se sua função na síntese de proteínas e moléculas de clorofila, fosforilação, utilização e partição de fotoassimilados, bem como na mitigação das ERO (CAKMAK; YAZICI, 2010; MARSCHNER, 2012).

Geng et al. (2021), observaram que juntamente com os efeitos produtivos, a má nutrição com Mg reduz a absorção de íons, bem como a qualidade e quantidade de sementes produzidas, indicando que a deficiência de Mg é uma problemática desde a etapa de seleção de propágulos. Além disso, o Mg afeta ainda, o acúmulo de açúcares em tecidos vegetais, sendo considerado como um promotor de qualidade (HERMANS et al., 2004; GARCIA et al., 2020).

Contudo, apesar de sua importância na planta, este elemento é frequentemente esquecido no manejo nutricional das culturas agrícolas (CAKMAK; YAZICI, 2010). Em virtude disto, a deficiência de Mg tem se elevado e se tornado um fator limitante de produção agrícola (CAKMAK; YAZICI, 2010; GRANSEE; FÜHRS, 2013; GUO et al., 2016). Tal deficiência, pode ocorrer em função da baixa disponibilidade natural do solo ou em função da inibição por outros cátions (GRANSEE; FÜHRS, 2013).

A deficiência nutricional, sobretudo a de Mg, impacta negativamente a capacidade das plantas em responder as intemperes ambientais, como o estresse oxidativo originado por calor (DA SILVA et al., 2017; SIDDIQUI et al., 2018). Isto se dá em virtude da contribuição do Mg para o funcionamento dos complexos enzimáticos e não enzimáticos, uma vez que atua como cofator enzimático, além de ser o átomo central da molécula de clorofila (MARSCHNER, 2012).

Hauer-Jákli & Tränkner, (2019) em levantamento sistemático de literatura acerca do impacto da nutrição com Mg na produção e sistema foto-oxidativo vegetal, observaram que quando suplementado adequadamente, o Mg aumenta a produção, assimilação de CO₂ e produção de biomassa, além reduzir a concentração de ERO.

Além disso, Siddiqui et al., (2018) observaram menor taxa de extravasamento de eletrólitos, teor de ERO, além de favorecer a atividade das enzimas Rubisco, CAT, POD e SOD em plantas de *Vicia faba* suplementadas com Mg em condições de estresse térmico. Neste sentido, o manejo do adequado da nutrição com Mg torna-se uma alternativa para favorecer a adaptação de culturas a regiões de climas quentes.

Cultivo hidropônico

O sistema de cultivo de hortaliças em hidroponia tem se expandido no Brasil, devido ser um sistema altamente controlado, fato este que apresenta uma série de vantagens em relação ao cultivo convencional no solo, promovendo altas produtividades (ALBERONI, 1998; SAMBO, et al., 2019). Dentre as culturas produzidas em hidroponia, destaca-se a alface (SALA; DA COSTA, 2012; MAHLANGU et al., 2016; MAMPHOLO et al., 2018).

Avaliando o desempenho das cultivares mimosa verde e mimosa roxa em sistema convencional e hidropônico, Rosa et al. (2014), observaram que o sistema hidropônico proporcionou melhor desempenho produtivo e fisiológico em ambas as cultivares. Os altos rendimentos obtidos nos sistemas hidropônicos se devem, também, ao fornecimento dos nutrientes via solução nutritiva, a qual contempla as demandas essenciais das culturas, além de possibilitar a produção com qualidade em qualquer época do ano, com maior uniformidade, maior densidade de plantas por área além de dispensar rotação de culturas e demandar menor utilização de insumos no controle fitossanitário, dentre outras (MARTINS et al., 2009; CORREA et al., 2012; SAMBO, 2019).

Por conta disso, os sistemas hidropônicos têm sido muito estudados, sobretudo quanto aos ajustes de soluções nutritivas, devido a possibilidade do controle tanto em nível quantitativo como qualitativo dos nutrientes (FURLANI et al., 1999). Junior et al. (2007) em trabalho avaliando o desenvolvimento de alface hidropônico cultivar Vera sob diferentes formulações de soluções nutritivas e vazões distintas, observaram incrementos significativos em acúmulo biomassa e diâmetro de caule, indicando a importância do manejo da solução nutritiva para a produção e crescimento dessa cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERONI, R. B. **Hidroponia: Como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo**. Editora Nobel. São Paulo-SP. 102 p. 1998.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annu. Rev. Plant Biol.** 55, 373–399, 2004. doi: 10.1146/annu.rev.arplant.55.031903.141701
- ANTONIO, P.; VIERA, I. Carotenoids and Chlorophylls as Antioxidants. **Antioxidants**, v. 9, n. 505, p. 34, 2020.
- BARBOSA, M. R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. p. 453–460, 2014.

BATISTA, T. *et al.* Avaliação nutricional da alface cultivada em soluções nutritivas suprimidas de macronutrientes. **Revista Biotemas**, v. 24, n. 2, p. 2175–7925, 2011.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. **Better Crops**, v. 94, n. 2, p. 23–25, 2010.

CAMPOS, M. C. Territorialização da agricultura orgânica no Paraná: preservando o meio ambiente e produzindo alimentos saudáveis. 2005. Disponível em: <http://www.igeo.uerj.br/VICBG-2004/Eixo1/e1%20279.htm>. Acesso em: 03/07/2022

CHEN, W. R. *et al.* Effects of high temperature on photosynthesis, chlorophyll fluorescence, chloroplast ultrastructure, and antioxidant activities in fingered citron. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 59, n. 6, p. 732–740, 2012.

CHUNG, R. M.; AZEVEDO FILHO, J. A.; COLARICCIO, A. Avaliação da reação de genótipos de alface (*Lactuca sativa* L.) ao Lettuce Mosaic Virus (LMV). **Bragantia**, n° 66. P. 61-68. 2011.

CORREA, R. M.; PINTO, S. I. C.; REIS, E. S.; CARVALHO, V. A. M. **Hydroponic production of fruit tree seedlings**. In: ASAO, T. (Ed.) Hydroponics – A standard methodology for plant biological researches. InTech, Croácia. p.225-244. 2012.

DOĞRU, A. Effects of heat stress on photosystem II activity and antioxidant enzymes in two maize cultivars. **Planta**, v. 253, n. 4, p. 85, 2021.

DUTTA, S.; MOHANTY, S.; TRIPATHY, B. C. Role of temperature stress on chloroplast biogenesis and protein import in pea1[OA]. **Plant Physiology**, v. 150, n. 2, p. 1050–1061, 2009.

FAHAD, S. *et al.* Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. June, p. 1–16, 2017.

FAOSTAT. Crops and livestock products. Disponível em: <<http://fenix.fao.org/faostat/internal/en/#data/QCL>>. Acesso em 03 de julho de 2022.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 421 p.

GARCIA, A. *et al.* Magnesium as a Promoter of Technological Quality in Sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 1, p. 19–30, 2020.

GENG, G. *et al.* Effect of magnesium fertilization on seed yield, seed quality, carbon assimilation and nutrient uptake of rapeseed plants. **Field Crops Research**, v. 264. p. 108082, 2021.

GIRI, A. *et al.* Heat stress decreases levels of nutrient-uptake and assimilation proteins in tomato roots. **Plants**, v. 6, n. 1, p. 443–448, 2017.

GRANSEE, A.; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, v. 368, n. 1–2, p. 5–21. 2013.

GUO, W. *et al.* Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **The Crop Journal**, v. 4, n. 2, p. 83–91. 2016.

- GUIMARÃES, M. D. A., MANDELLI, M. S., & SILVA, D. J. H. D. Seleção de genótipos de *Lactuca sativa* L. para a produção com adubação orgânica. **Revista Ceres**, v. 58, p. 202-207, 2011.
- HASANUZZAMAN, M. *et al.* Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 5, p. 9643–9684, 2013.
- HASANUZZAMAN, M. *et al.* Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. **Antioxidants**, v. 9, n. 8, p. 1–52, 2020.
- HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10. 2015.
- HAUER-JÁKLI, M.; TRÄNKNER, M. Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: A systematic review and meta-analysis from 70 years of research. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1–15, 2019.
- HERMANS, C. *et al.* Physiological characterisation of magnesium deficiency in sugar beet: Acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v. 220, n. 2, p. 344–355, 2004.
- HOLMES, S. C. *et al.* Selection of heat tolerant lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars grown in deep water culture and their marketability. **Horticulturae**, v. 5, n. 3, p. 1–11, 2019.
- HUANG, H. *et al.* Mechanisms of ROS Regulation of Plant Development and Stress Responses. v. 10. p. 1–10, 2019.
- JUNIOR, C. H.; REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A.; SANTOS, H. S.; DALLACORT, R. Produção hidropônica da cultura da alface com soluções nutritivas e vazões distintas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 3, 2007. p. 391-395.
- KARUPPANAPANDIAN, T. *et al.* Reactive oxygen species in plants : Their generation , signal transduction, and scavenging mechanisms mechanisms. 2011.
- KUMAR TEWARI, R.; KUMAR, P.; NAND SHARMA, P. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants. **Scientia Horticulturae**, v. 108, n. 1, p. 7–14, 2006.
- LANFER-MARQUEZ, U. M.; BARROS, R. M. C.; SINNECKER, P. Antioxidant activity of chlorophylls and their derivatives. v. 38, p. 885–891, 2005.
- LIU, R. *et al.* LsHSP70 is induced by high temperature to interact with calmodulin, leading to higher bolting resistance in lettuce. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2020.
- MAHLANGU, R. I. S.; MABOKO, M. M.; SIVAKUMAR, D.; SOUNDY, P.; JIFON, J. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 12, 2016. p. 1766-1775
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

- MAMPHOLO, B. M.; MABOKO, M. M.; SOUNDY, P.; SIVAKUMAR, D. Variety-specific responses of lettuce grown in a gravel-film technique closed hydroponic system to N supply on yield, morphology, phytochemicals, mineral content and safety. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 11, 2018. p. 2447-2457.
- MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. [s.l.] Elsevier, 2012.
- MARTINS, C. M.; DE MEDEIROS, J. F.; LOPES, W. D. A. R.; BRAGA, D. F.; DE AMORIM, L. B. Curva de absorção de nutrientes em alface hidropônica. **Revista Caatinga**, v.22, n.4, 2009. p.123-128.
- MARUTANI, Y. *et al.* Damage to photosystem II due to heat stress without light-driven electron flow: Involvement of enhanced introduction of reducing power into thylakoid membranes. **Planta**, v. 236, n. 2, p. 753–761, 2012.
- MENGUTAY, M. *et al.* Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant and Soil**, v. 368, n. 1–2, p. 57–72, 16 jul. 2013.
- MUSSO, C. G. Magnesium metabolism in health and disease. **International Urology and Nephrology**, v. 41, n. 2, p. 357–362, 10 jun. 2009.
- PESSARAKLI, M. **Handbook of Plant and Crop Physiology**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2014. v. 3
- RANJEET R. KUMAR. Protection against heat stress in wheat involves change in cell membrane stability, antioxidant enzymes, osmolyte, H₂O₂ and transcript of heat shock protein. **International Journal of Plant Physiology and Biochemistry**, v. 4, n. 4, p. 83–91, 2012.
- ROSA, A. M.; SEÓ, H. L. S.; VOLPATO, M. B.; FOZ, N. V.; SILVA, T. C. D.; OLIVEIRA, J. L. B.; PESCADOR, R.; OGLIARI, J. B. Production and photosynthetic activity of Mimosa Verde and Mimosa Roxa lettuce in two farming systems. **Revista Ceres**, v. 61, p. 494-501, 2014.
- SALA, F. C.; DA COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 187–194, abr. 2012.
- SAMBO, P. *et al.* Hydroponic solutions for soilless production systems: issues and opportunities in a smart agriculture perspective. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019
- SANTOS, C. P. dos. *et al.* Morphological evaluation of lettuce genotypes grown under hydroponic system. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 312–318, 21 set. 2021.
- SHARMA, A. *et al.* Photosynthetic Response of Plants Under Different Abiotic Stresses: A Review. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, n. 2, p. 509–531, 2020.
- SIDDIQUI, M. H. *et al.* Morphological and physiological characterization of different genotypes of faba bean under heat stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 22, n. 5, p. 656–663, 2015.
- SIDDIQUI, M. H. *et al.* Mitigation of adverse effects of heat stress on Vicia faba by exogenous application of magnesium. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 7, p. 1393–1401, nov. 2018.

SILVA, D. M. da. *et al.* The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress. **Scientia Horticulturae**, v. 224. p. 115–125, 2017.

SILVA, E. C. *et al.* Inheritance of bolting tendency in lettuce *Lactuca sativa* L . n. 1979, p. 1–7, 1999.

SINGH, A. *et al.* Reactive oxygen species-mediated signaling during abiotic stress. **Plant Gene**, v. 18, p. 100173, 2019.

WAHID, A. *et al.* Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, n. 3, p. 199–223, 2007.

VILLAS BÔAS RL; PASSOS JC; FERNANDES M; BÜLL LT; CEZAR VRS; GOTO R. Efeito de doses e tipos de compostos orgânicos na produção de alface em dois solos sob ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**. n. 22, p. 28-34. 2004.

DESEMPENHO PRODUTIVO, FISIOLÓGICO E QUALITATIVO DE CULTIVARES DE ALFACE HIDROPÔNICA SOB CONDIÇÃO DE ELEVADA TEMPERATURA

RESUMO

A alface (*Lactuca sativa*) é a hortaliça folhosa de maior importância econômica do Brasil, sendo o tipo crespa o mais popular entre os produtores. Contudo, em regiões de climas quentes a alface apresenta limitações produtivas sobretudo em função do pendoamento precoce, demandando o conhecimento do comportamento das cultivares disponíveis no mercado. Assim, objetivou-se caracterizar o desempenho de cultivares de alface crespa quanto aos seus aspectos produtivos, fisiológicos e de qualidade pós-colheita, em cultivo hidropônico sob condição de elevada temperatura. As plantas foram cultivadas em casa de vegetação em sistema hidropônico com substrato inerte. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado com nove tratamentos (Veneranda, Cristina, Olinda, Mônica, Cinderela, Grand Rapids, Itapuã Super, Crocantela e Simpson Black Seed) e quatro repetições. As cultivares foram analisadas quanto aos seus desempenhos produtivos, fisiológicos e de qualidade pós-colheita. Neste sentido por meio da análise de agrupamento, foi possível formar três grupos de aptidão, onde destacamos as cultivares Olinda e Cristina, as quais foram classificadas como de “elevada” aptidão, apresentando bom desempenho produtivo, fisiológico e de qualidade pós-colheita. Estas duas, contudo, possuem características sensorial distinta, sendo que a cultivar Cristina apresenta características de interesse para o mercado tradicional que prefere alfaces de coloração verde clara, enquanto a cultivar Olinda atende um nicho de mercado de alimentos nutraceuticos, que vem ganhando destaque na alficultura, sendo uma cultivar de coloração verde intensa, rica em pigmentos antioxidantes e vitamina C. Verificou-se que o pendoamento afetou negativamente as trocas gasosas, produção e qualidade pós-colheita das cultivares de alfaces Veneranda, Mônica, Grand Rapids e Cinderela. Em adição, observou-se que o teor de pigmentos não foi determinante para a expressão do pendoamento, estando isto relacionado as características genéticas da cultivar. Logo, o estudo recomenda o uso das cultivares Olinda e Cristina para o cultivo de alface hidropônica em condições de elevada temperatura.

Palavras-chave: Alface; Pendoamento precoce; Pigmentos fotossintéticos; Hidroponia.

PRODUCTIVE, PHYSIOLOGICAL AND QUALITATIVE PERFORMANCE OF HYDROPONIC LETTUCE CULTIVARS UNDER HIGH TEMPERATURE CONDITION

ABSTRACT

Lettuce (*Lactuca sativa*) is the most economically important leafy vegetable in Brazil, with the crisp type being the most popular among producers. However, in regions with hot climates, lettuce has production limitations mainly due to bolting, demanding knowledge of the behavior of cultivars available on the market. Thus, the objective was to characterize the performance of crisp lettuce cultivars in terms of their productive, physiological and post-harvest quality aspects, in hydroponic cultivation under high temperature conditions. The plants were grown in a greenhouse in a hydroponic system with an inert substrate. The design used was completely randomized with nine treatments (Veneranda, Cristina, Olinda, Mônica, Cinderela, Grand Rapids, Itapuã Super, Crocantela and Simpson Black Seed) and four replications. The cultivars were analyzed in terms of their productive, physiological and post-harvest quality performances. In this sense, through cluster analysis, it was possible to form three groups of aptitude, where we highlight the cultivars Olinda and Cristina, which were classified as having "high" aptitude, presenting good productive, physiological and post-harvest quality performance. These two, however, have distinct sensory characteristics, and Cultivar Cristina has characteristics of interest to the traditional market, which prefers light green lettuces, while Cultivar Olinda serves a niche market for nutraceuticals, which has been gaining prominence, being a cultivar with an intense green color, rich in antioxidant pigments and vitamin C. It was found that bolting negatively affected gas exchange, production and postharvest quality of lettuce cultivars Veneranda, Mônica, Grand Rapids and Cinderela. In addition, it was observed that the pigment content was not determinant for the expression of bolting, this being related to the genetic characteristics of the cultivar. Therefore, the study recommends the use of cultivars Olinda and Cristina for the cultivation of hydroponic lettuce under high temperature conditions.

Keywords: Lettuce; Bolting; Photosynthetic pigments; Hydroponics.

INTRODUÇÃO

O aquecimento global, juntamente com o aumento da população mundial, tem representado severa ameaça à segurança alimentar em escala global (FARHAT et al., 2016). Estimativas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC indicam o incremento de 1,5 a 4 °C da temperatura média global até o fim deste século (IPCC, 2013), o que acarretará na ocorrência de problemas no cultivo de plantas, sobretudo em regiões de climas quentes, as quais se caracterizam pelas temperaturas elevadas e baixa variabilidade térmica anual.

O efeito do aquecimento global acaba se agravando para as culturas termossensíveis, tal qual a alface (*Lactuca sativa*), uma vez que a temperatura elevada resulta em limitações produtivas e qualitativas (HOLMES et al., 2019; DE MENEZES FORTES et al., 2020). Nessas condições ocorrem desbalanços no funcionamento bioquímico e fisiológico da planta, prejudicando reações vitais como a fotossíntese, absorção de água e nutrientes, assimilação de nutrientes, regulação osmótica e translocação de assimilados, uma vez que a temperatura é determinante para atividade enzimática (WAHID et al., 2007; ALLAKHVERDIEV et al., 2008; GIRI et al., 2017).

No Brasil, a alface representa grande importância econômica, sendo o tipo crespa o mais comercializado (BATISTA et al., 2011; SANTOS et al., 2021). Contudo, o cultivo desta espécie apresenta limitações fisiológicas e produtivas relacionadas ao clima de algumas regiões do país, sobretudo no Norte e Nordeste, uma vez que, ambientes com temperatura superior a 28 °C são considerados, estressantes e estimulam a expressão do pendoamento precoce, inibindo a expressão do potencial produtivo da cultura (SILVA et al., 1999; HOLMES et al., 2019; LIU et al., 2020).

Uma vez iniciada a estágio reprodutivo, o desenvolvimento reprodutivo é priorizado em detrimento do vegetativo, em função de estruturar a planta para perpetuar a espécie (TAIZ et al., 2017), o que para hortaliças folhosas como a alface, resulta em redução da produção. Em adição a isso, o pendoamento altera o aspecto visual da planta, além de induzir a síntese de látex nas folhas, reduzindo a sabor da mesma (ALBERONI, 1998; LUZ et al., 2009).

Além do manejo frente os fatores abióticos, o material genético da cultivar utilizada para cultivo afeta a expressão do pendoamento precoce (SOUZA, 2006). Logo, dentre as estratégias viáveis para o cultivo destas espécies em condições de clima quente, destaca-se a seleção de materiais genéticos que apresentem mecanismos de adaptação a estas condições,

além de características de interesse para o mercado consumidor (CAMEJO et al., 2005; SIDDIQUI et al., 2015; AL MAHMUD et al., 2021; SANTOS et al., 2021).

Em plantas de alface, os genes que induzem o pendoamento precoce tem como gatilho a geração de ERO, ocasionada pelo estresse térmico (LIU et al., 2020). Desta forma, os teores de clorofilas e carotenoides, os quais possuem funções antioxidantes, podem atuar como mecanismos de tolerância ao pendoamento precoce (LANFER-MARQUEZ; BARROS; SINNECKER, 2005; ANTONIO; VIERA, 2020). Neste sentido, Santos et al. (2021), destacam aspectos como arquitetura da planta, produtividade, anatomia foliar e coloração das folhas para avaliar o desempenho de materiais de alface, em relação a tolerância ao pendoamento precoce.

Em função disso, este estudo tem como hipótese de que a tolerância ao pendoamento precoce da alface em condições de temperatura elevada depende das características genéticas da cultivar. Desta forma, objetivou-se caracterizar o desempenho de cultivares de alface crespa em sistema hidropônico quanto aos seus aspectos produtivos, fisiológicos e de qualidade pós-colheita sob temperaturas elevadas.

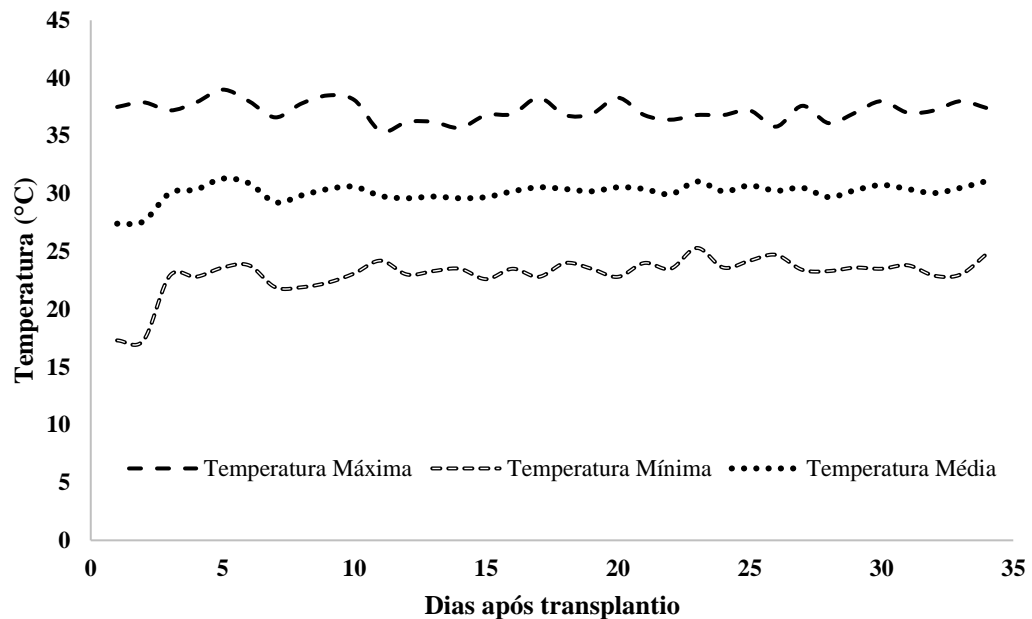
MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e cultivares utilizadas

O experimento ocorreu no período de 06 de janeiro até 08 de fevereiro de 2021, sendo conduzido em condições de casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo, no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), campus Belém-PA (1°28'S, 48°30'W, 9 m de altitude). O clima da localidade do experimento é classificado por Köppen como “*Afi*”, com temperatura média superior a 26 °C e precipitação anual de 3100 mm, (ALVARES et al., 2013).

Durante a condução do experimento, foram monitoradas a temperatura e umidade no interior da casa de vegetação por meio de um termo higrômetro (Figura 1). Observou-se amplitude térmica variando em média de 37,4 °C (temperatura máxima) e 24,8 °C (temperatura mínima) com temperatura média de 30,11 °C e umidade relativa do ar de 63,47 %, respectivamente.

Figura 1 – Temperatura no interior da casa de vegetação durante o experimento.



O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com 9 tratamentos e 4 repetições, perfazendo um total de 36 unidades experimentais. A unidade experimental foi composta por duas plantas de alface cada. Os tratamentos foram compostos de diferentes cultivares de alface, sendo estas: Veneranda (Feltrin®), Cristina (Hortivale®), Olinda (Hortivale®), Mônica (Feltrin®), Cinderela (Feltrin®), Grand Rapids (Feltrin®), Itapuã Super (Isla®), Crocantela (Feltrin®) e Simpson Black Seed (Isla®). Estas cultivares tem como característica comum a tolerância ao pendoamento precoce e ao distúrbio “tip-burn” em temperatura elevada.

As mudas foram produzidas através de semeio em bandeja de poliestireno (128 células) preenchida com substrato fibra de coco, na densidade de três sementes por célula. O substrato teve a umidade mantida, utilizando água destilada para a rega. Após 7 dias do semeio (DAS), realizou-se o desbaste das plântulas, mantendo apenas a mais vigorosa. Posteriormente, as bandejas foram transferidas para bancadas do tipo berçário, onde receberam solução nutritiva na formulação 2 de Hoagland & Arnon (1950), à 25% da força iônica.

O transplante das mudas para o sistema hidropônico ocorreu 20 DAS, quando as plantas apresentavam quatro folhas definitivas. Foi utilizado no ensaio um sistema hidropônico com substrato (sílica moída esterilizada). Foram utilizados vasos com capacidade para 2 L, os quais foram preenchidos com substrato. O substrato foi esterilizado através de imersão em solução à

1% de ácido clorídrico (HCl) por sete dias e posterior lavagem com água destilada em abundância para retirar resíduos do ácido.

Os vasos foram perfurados próximos a sua base, sendo acoplado um mecanismo de tubo de borracha para controlar a drenagem de solução. Além disto, os vasos foram revestidos com papel aluminizado para manutenção da temperatura da solução nutritiva. Além disto, os coletores de solução nutritiva foram revestidos com tinta metálica aluminizada, sendo adaptadas utilizando um sistema de suporte no gargalo das garrafas, para facilitar a drenagem da solução.

Para o cultivo das plantas, utilizou-se a formulação padrão 2 de Hoagland & Arnon (1950) à 50% da concentração iônica, sendo os vasos preenchidos com 400 ml desta (Figura 2). Para preparo da solução foram utilizados sais puros para análise. A reposição e drenagem da solução (aeração) nutritiva foram feitas, respectivamente, no início da manhã e final da tarde, manualmente e com frequência diária.

Figura 2 – Disposição dos vasos nas bancadas no interior da casa de vegetação.



Fonte: Ricardo Falesi P. de M Bittencourt, 2021.

A renovação da solução ocorreu com frequência semanal, sendo monitorado o pH diariamente através de um peagâmetro de bolso (GroLine HI98118 - HANNA®) e, quando necessário, foi realizada a correção do mesmo por meio de soluções de NaOH 1N ou ácido cítrico 1N, mantendo-o na faixa de 5,5 a 6,5. A água perdida por evapotranspiração foi fornecida regularmente com base na quantidade exportada, utilizando água destilada.

Do transplantio até o dia da colheita, as plantas foram monitoradas visando identificar indícios de pendoamento precoce, caracterizados pelo alongamento do caule, o qual cresce em altura e decresce em espessura (DE MENEZES FORTES et al., 2020). A classificação do grau de pendoamento das plantas foi realizada de acordo com escala adaptada de Holmes et al. (2019), onde: 0 = ausência de alongamento do caule; 1 = alongamento visível do caule; 2 = alongamento do caule com formação inicial da estrutura do pendão; 3 = Alongamento do caule e formação da inflorescência; 4 = Formação do florescimento.

Trocas gasosas

Aos 49 DAS, foi realizada leitura de trocas gasosas no período de 08:00 às 12:00 h da manhã, sendo a leitura realizada no terceiro par de folhas, no sentido basipeto. Para avaliação dos parâmetros de trocas gasosas, utilizou-se um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA, modelo LI6400XT, LICOR®) sob concentração externa de CO₂ de 400 µmol⁻¹ de ar e PAR artificial de 1000 µmol de fótons m⁻² s⁻¹.

Os parâmetros fisiológicos avaliados foram a taxa de fotossíntese líquida (P_n , µmol CO₂ m⁻² s⁻¹), condutância estomática (G_s , µmol H₂O m⁻² s⁻¹), carbono intercelular (C_i , µmol mol⁻¹), transpiração (E , µmol m⁻² s⁻¹), temperatura da folha (°C) e eficiência instantânea do uso da água (WUE , mmol CO₂ mol⁻¹ H₂O) - obtida pela razão entre P_n e E .

Quantificação de pigmentos fotossintéticos

Posteriormente a análise de trocas gasosas, realizou-se a coleta no terceiro par de folhas para a extração e quantificação dos teores de clorofilas e carotenoides. Para tal, utilizou-se a metodologia de Lichtenthaler (1987), sendo realizada a homogeneização no escuro de 1 mg de tecido vegetal fresco em grau contendo 5 mL de solução de acetona à 80%. O extrato obtido foi filtrado e transferido para balão volumétrico com capacidade de 25 mL, sendo o volume deste completado com solução de acetona à 80%. Após isto, realizou-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro (Fento, modelo 700 S), nos comprimentos de onda de 470 nm, 646,8 nm e 663,2 nm. Os resultados foram expressos em mg g⁻¹ de matéria fresca.

Crescimento e acúmulo de massa

Aos 50 DAS, as plantas foram colhidas e compartimentadas em folhas, caule e raiz, para mensuração das variáveis morfológicas: a) altura da planta (H, cm) - medida por meio de régua graduada; b) diâmetro do coleto (D – mm) - medido por meio de um paquímetro; c) área foliar (AF, cm² planta⁻¹) - determinada com o auxílio de um aparelho integrador de área foliar,

LICOR[®] modelo LI-3100; d) massa fresca e seca das folhas (g planta⁻¹); e) massa fresca e seca de caule (g planta⁻¹); f) massa fresca e seca das raízes (g planta⁻¹); g) massa fresca total (g planta⁻¹) quantificadas a partir da pesagem das massas da parte aérea e raiz. As massas frescas foram determinadas através de pesagem em balança de precisão analítica (0,001g). As massas secas foram obtidas através de secagem de material fresco à 60°C em estufa de circulação forçada de ar e posterior pesagem.

Qualidade pós-colheita

Além disto, foram coletadas amostras de folha para caracterização da qualidade pós-colheita das alfaces. Nesta etapa, foram avaliados o teor de ácido ascórbico, sólidos solúveis totais (SST), pH, acidez titulável (AT) e relação SST/AT. O teor de ácido ascórbico foi quantificado pelo método titulométrico de Tillman, utilizando como titulante a solução de 2,6 dicloroindolfenol – DFI, à 0,02%, até que se atinja coloração róseo claro (STROHECKER & HENNING, 1967; INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). O extrato foi composto por 1 g de folhas frescas de alface maceradas em grau, imersas em 50 mL de solução de ácido oxálico à 0,5%. Retirou-se uma alíquota de 5 mL do extrato, o qual foi transferido para um erlenmeyer de 125 mL, sendo completado o volume até 50 mL com água destilada e, posteriormente, titular a solução de Tillman refrigerada, até o ponto de viragem. Fazer duas repetições por amostra. Para as provas em branco, foi utilizada solução padrão de ácido ascórbico contendo 50 µg mL⁻¹. Sendo o resultado expresso em mg de ácido ascórbico por 100 g folha⁻¹.

Os sólidos solúveis totais foram determinados por meio de um refratômetro digital com correção automática de temperatura. Realizou-se a maceração de 1 g de folha fresca e se transferiu 2 gotas do extrato para o prisma do equipamento (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY, 2012). Os resultados foram expressos em °Brix (%).

Para a determinação do pH das amostras, 1 g de folha fresca macerada foi adicionado à 30 ml de água destilada. Após a isto, realizou-se a leitura da amostra utilizando um peagâmetro de bancada – PHOX P1000 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). A acidez titulável – AT, foi determinada de acordo com a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008), através da titulação do extrato (1 g de folha fresca homogeneizada e indicador de fenolftaleína à 1%, sendo completado para um volume de 50 mL utilizando água destilada) com solução de NaOH 0,1 N, com resultados expressos em % de ácido cítrico. A relação SST/AT das amostras foi calculada pela razão entre estas duas variáveis.

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos a teste de normalidade de Shapiro-Wilk e homocedasticidade de Bartlett. Atendendo a estes pressupostos, procedeu-se com a análise de variância pelo teste F e quando significativo, as médias foram testadas utilizando método de Scott-Knott à 5% de significância.

Para análise de agrupamento foram considerados nos modelos os dados de crescimento, acúmulo de biomassa, teores de pigmentos e desempenho fisiológico utilizando os valores médios das cultivares. O grau de similaridade foi obtido pela distância Euclidiana padrão, sendo utilizado como método de agrupamento o “k-means”, com prefixação de formação de três grupos com base na aptidão para cultivo na região. Para tais análises, utilizou-se o software R-Studio (R Core Team, 2020).

RESULTADOS

Crescimento e produção

Foram observadas diferenças entre as cultivares ($p < 0,05$) para as variáveis de crescimento e produção (Tabela 1). Em relação ao crescimento, especificamente para altura de planta (H) foram estabelecidos cinco grupos, com maior valor assinalado para a cultivar Mônica, seguida pelas cultivares Veneranda e Cinderela, as quais apresentaram médias de altura entre 20,75 e 18,93 cm, respectivamente. O grupo que apresentou menor média H (3,76 cm) foi composto pelas cultivares Crocantela, Itapuã Super, isto é, um valor inferior em 83,99% da altura média do grupo que apresentou maior altura.

Contudo, em relação ao diâmetro do caule (D), observou-se comportamento inverso ao apresentado pela altura, com as cultivares Grand Rapids, Mônica, Veneranda, Cinderela e Itapuã Super representando o grupo com menor D (média de 9,53 mm), enquanto a cultivar Olinda apresentou maior espessura, cerca de 72,09% superior à média do grupo de menor desempenho. Foram observados para as cultivares que apresentaram caule com elevada H e de baixo D, indícios de pendoamento precoce, com grau de incidência 1, para Cinderela e Grand Rapids e grau 2 para Mônica e Veneranda.

Tabela 1 – Médias de Altura - H (cm), diâmetro - D (mm), número de folhas - NF, área foliar (cm²), incidência de pendoamento (%) – IP, grau de pendoamento – GP e idade até o início do florescimento – FS, obtidos da avaliação de nove cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico sob condição de elevada temperatura.

Cultivares	H (cm ⁻¹)	D (mm ⁻¹)	NF	AF (cm ²)	IP ¹ (%)	GP ²	FS ³
Veneranda	20,75 ± 4,52 b	9,43 ± 0,64 c	14,75 ± 0,96 d	922,45 ± 88,37 b	100	2	39
Cristina	6,48 ± 0,62 d	11,54 ± 0,90 b	16,25 ± 0,50 c	1025,82 ± 117,34 a	0	0	-
Olinda	7,55 ± 1,28 d	13,22 ± 0,91 a	22,00 ± 0,82 a	1165,35 ± 88,75 a	0	0	-
Mônica	23,48 ± 2,16 a	9,16 ± 0,52 c	17,00 ± 0,82 c	978,05 ± 37,06 a	100	2	36
Cinderela	18,93 ± 1,62 b	9,92 ± 0,69 c	13,75 ± 1,26 e	885,80 ± 59,12 b	100	1	37
Grand Rapids	14,70 ± 2,91 c	9,09 ± 0,96 c	13,50 ± 0,58 e	848,48 ± 89,13 b	100	1	38
Itapuã Super	4,96 ± 1,30 e	10,06 ± 1,18 c	15,50 ± 0,58 d	837,48 ± 199,52 b	0	0	-
Crocantela	2,56 ± 0,97 e	11,07 ± 1,44 b	14,25 ± 0,96 e	757,85 ± 241,49 b	0	0	-
Simpson Black Seed	7,73 ± 1,51 d	11,69 ± 1,70 b	18,00 ± 0,82 b	925,98 ± 123,65 b	0	0	-

¹Incidência de pendoamento foi obtida através da observação de indícios de alongamento do caule na população avaliada ($n = 4$); ²– Escala de grau de pendoamento adaptado de Holmes et al., (2019); ³ - Idade (em dias) até o início do pendoamento; Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro da coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade, indicando similaridades entre os grupos.

Em relação ao número de folhas (NF), a cultivar Olinda foi a que apresentou maior NF, enquanto as pendoadas Grand Rapids e Cinderela, apresentaram uma média de NF inferior em 62,88% em relação a esta. Em relação a área foliar, como esperado, a cultivar Olinda se destacou, contudo, com desempenho similar as cultivares Cristina e Mônica. Este primeiro grupo apresentou média de área foliar com limites de 978,05 e 1165,35 cm². Vale destacar o desempenho produtivo da cultivar Mônica, a qual apesar do pendoamento precoce, manteve a produção de área foliar, sendo englobada no grupo de maior desempenho.

Seguindo este padrão, observou-se maior acúmulo de biomassa foliar fresca e seca (Tabela 2) pelas cultivares Olinda e Cristina, com superioridade de 23,81% e 32,21%, respectivamente em relação ao segundo grupo, o qual englobou o restante das cultivares. Em relação ao acúmulo de massa fresca de caule, foi observado maiores valores para as cultivares Cinderela, Veneranda e Mônica, com a cultivar Crocantela, obtendo menor massa. Para massa seca de caule, foram formados quatro grupos, com a cultivar Veneranda apresentando maior acúmulo, seguida em outro grupo, composto pelas cultivares Cinderela e Mônica.

Tabela 2 – Acúmulo de biomassa fresca e seca de folhas, caule e raízes obtidos da avaliação de nove cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico em condição de elevada temperatura.

Cultivares	Massa fresca (g planta ⁻¹)			Massa seca (g planta ⁻¹)		
	Folhas	Caule	Raízes	Folhas	Caule	Raízes
Veneranda	28,91 ± 2,72 b	15,44 ± 0,91 a	5,51 ± 1,06 a	2,34 ± 0,15 b	1,68 ± 0,31 a	0,80 ± 0,06 a
Cristina	36,54 ± 6,03 a	6,83 ± 1,24 c	6,70 ± 1,36 a	3,15 ± 0,23 a	0,68 ± 0,14 c	0,63 ± 0,14 a
Olinda	39,64 ± 2,70 a	9,07 ± 2,46 b	7,99 ± 1,15 a	3,37 ± 0,11 a	0,84 ± 0,15 c	0,74 ± 0,11 a
Mônica	29,18 ± 2,01 b	14,59 ± 1,45 a	3,71 ± 0,44 b	2,06 ± 0,13 b	1,24 ± 0,19 b	0,64 ± 0,03 a
Cinderela	29,81 ± 2,00 b	15,82 ± 1,28 a	6,19 ± 2,36 a	2,42 ± 0,19 b	1,39 ± 0,11 b	0,79 ± 0,19 a
Grand Rapids	24,73 ± 1,92 b	10,23 ± 2,68 b	3,91 ± 2,15 b	2,09 ± 0,16 b	0,97 ± 0,25 c	0,53 ± 0,12 b
Itapuã Super	30,77 ± 7,66 b	4,53 ± 1,97 d	3,03 ± 1,96 b	2,32 ± 0,27 b	0,37 ± 0,15 d	0,41 ± 0,15 b
Crocantela	30,52 ± 9,34 b	1,74 ± 0,78 e	3,74 ± 1,55 b	2,02 ± 0,67 b	0,15 ± 0,06 d	0,40 ± 0,17 b
Simpson Black Seed	29,22 ± 5,35 b	6,26 ± 2,29 c	3,10 ± 1,39 b	2,19 ± 0,44 b	0,64 ± 0,18 c	0,51 ± 0,10 b

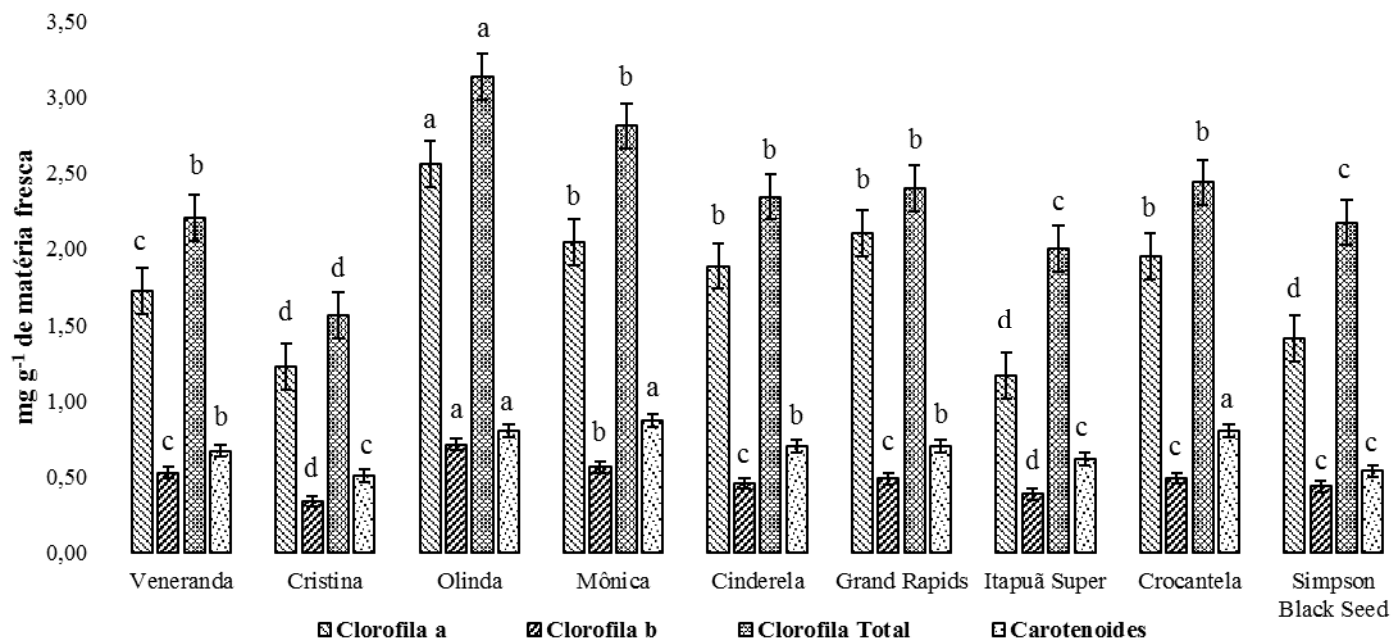
Médias seguidas pela mesma letra minúscula coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott à 5% de significância, indicando similaridades entre os grupos.

Em relação a produção de massa fresca de raízes, foram formados dois grupos, com as cultivares Olinda, Cristina, Cinderela e Veneranda pertencentes ao grupo com maior massa (com limites entre 6,70 e 5,51 g) e as cultivares Itapuã Super, Simpson Black Seed, Mônica, Crocantela e Grand Rapids (com massa entre 3,91 e 3,10 g). Para acúmulo de massa seca de raízes, semelhantemente ao observado para matéria fresca, a única alteração ocorreu pela entrada da cultivar Mônica no grupo de maior desempenho, o que resultou em uma média de massa seca de raízes superior em 36,11% em relação ao grupo com menor acúmulo.

Pigmentos fotossintéticos

Em relação a produção de pigmentos, foi possível observar diferenças ($p > 0,05$) em função das cultivares de alface (Figura 3). A cultivares Olinda se destacou nos teores de clorofila *a* e *b* e conseqüentemente, para teor total de clorofilas. Observou-se ainda comportamento inverso para as cultivares Cristina e Simpson, as quais se encaixaram no grupo de menor teor de clorofila *a*. Cv Cristina e Itapuã super apresentaram as menores médias de teor de clorofila *b*. Ainda acerca do teor total de clorofilas as cultivares que apresentaram pendoamento não diferiram entre si, e ainda apresentaram maiores teores que as cultivares Itapuã Super, Simpson Black Seed e Cristina.

Figura 3 – Teor de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides em cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônico sob condição de temperatura elevada.



Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott à 5% de significância, indicando similaridades entre os grupos. Barras verticais indicam o erro padrão da média.

Em relação ao teor de carotenoides, observou-se maiores teores nas cultivares Olinda, Mônica e Crocantela, e, menor teor para Cristina e Simpson. As cultivares pendoadas Cinderela, Veneranda e Grand Rapids, foram englobadas em um mesmo grupo em função do teor de carotenoides.

Desempenho fisiológico

O desempenho fisiológico, sofreu alterações em função das cultivares avaliadas (Tabela 3). Quanto a fotossíntese líquida (P_n) observou-se valores variando de 17,72 a 12,23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com a cultivar Itapuã Super apresentando melhor desempenho neste parâmetro, seguida pelas cultivares Olinda e Crocantela, em grupos diferentes. Em contraste, as cultivares Grand Rapids e Veneranda formaram o grupo que apresentou menor P_n , com média de 12,46 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Tabela 3 – Médias de fotossíntese líquida – Pn , condutância estomática – gs , transpiração – E , taxa de carbono interno – Ci , temperatura da folha – TF e eficiência de uso da água – WUE (obtida pela razão entre Pn e E), de cultivares de alface cultivadas em sistema hidropônica sob condição de elevada temperatura.

Cultivares	Pn ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	E ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	TF ($^{\circ}\text{C}$)	WUE ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$)
Veneranda	12,70 \pm 1,13 f	0,24 \pm 0,03 b	291,13 \pm 1,45 a	4,68 \pm 0,35 b	33,61 \pm 0,81 c	2,71 \pm 0,04 d
Cristina	15,24 \pm 0,98 d	0,22 \pm 0,01 b	267,53 \pm 3,53 b	4,37 \pm 0,08 b	33,60 \pm 1,22 c	3,50 \pm 0,29 c
Olinda	16,61 \pm 0,15 b	0,25 \pm 0,00 a	271,39 \pm 1,29 b	3,64 \pm 0,08 d	31,72 \pm 0,05 d	4,56 \pm 0,14 a
Mônica	14,96 \pm 0,25 d	0,23 \pm 0,01 b	272,15 \pm 5,87 b	4,55 \pm 0,66 b	34,34 \pm 1,05 b	3,39 \pm 0,52 c
Cinderela	14,13 \pm 0,25 e	0,18 \pm 0,00 c	252,67 \pm 0,30 c	3,41 \pm 0,14 d	33,83 \pm 0,28 c	4,15 \pm 0,25 b
Grand Rapids	12,23 \pm 0,31 f	0,14 \pm 0,01 d	234,85 \pm 16,02 d	3,39 \pm 0,00 d	35,81 \pm 0,56 a	3,61 \pm 0,09 c
Itapuã Super	17,72 \pm 0,47 a	0,27 \pm 0,01 a	267,61 \pm 0,23 b	4,96 \pm 0,50 a	34,37 \pm 0,51 b	3,61 \pm 0,28 c
Crocantela	16,06 \pm 0,71 c	0,21 \pm 0,02 c	250,01 \pm 7,17 c	4,12 \pm 0,52 c	34,50 \pm 0,27 b	3,95 \pm 0,34 b
Simpson Black Seed	13,99 \pm 0,21 e	0,22 \pm 0,02 c	273,06 \pm 8,06 b	5,16 \pm 0,10 a	35,78 \pm 0,66 a	2,71 \pm 0,09 d

Médias seguidas pela mesma letra minúscula coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade, indicando similaridades entre os grupos.

Para gs , foi evidenciada a formação de quatro grupos, sendo o de maior condutância composto pelas cultivares Itapuã Super e Olinda, e com menor desempenho, novamente observou-se a cultivar Grand Rapids, acompanhando o comportamento que foi observado em relação a Pn . Neste sentido, foram observados valores entre 0,27 e 0,14 mol H₂O m⁻² s⁻¹. Em relação a Ci foram observados valores entre 291,13 e 234,85 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, com destaque para as cultivares Veneranda e Grand Rapids, as quais apresentaram o maior e menor concentração de carbono intercelular, respectivamente.

Foram observadas para o parâmetro de E a formação de quatro grupos de cultivares, com valores médios de amplitude de 5,16 e 3,39 mmol H₂O m⁻² s⁻¹. Acompanhando o comportamento observado por Pn e Gs , a Cv Itapuã Super apresentou elevada E em relação as demais cultivares, sendo englobada em um grupo juntamente com a cultivar Simpson Black Seed, que apresentou comportamento antagônico em relação a Pn . Observou-se ainda, que estas cultivares apresentaram, a maior temperatura foliar e E .

Para a TF observou-se valores entre 35,78 a 31,72 $^{\circ}\text{C}$, com maior temperatura para as cultivares Simpson Black Seed e Grand Rapids e, menor temperatura para a cultivar Olinda. No que tange a WUE , foram observados valores entre 4,56 e 2,71 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$, destacando-se a eficiência da cultivar Olinda, a qual apresentou melhor desempenho em relação as demais cultivares avaliadas. Já as cultivares Veneranda e Simpson Black Seed demonstraram menor eficiência.

Qualidade pós-colheita

Em relação a qualidade pós-colheita das alfaces, foram observadas diferenças em todas as variáveis avaliadas ($p < 0,05$) para as cultivares de alface (Tabela 4). Para o teor de ácido ascórbico (AA), foram observados nas folhas dos materiais teores médios entre 21,014 e 17,753 mg 100 g⁻¹. Dois grupos foram formados em relação ao teor, com destaque para o grupo de maior acúmulo, composto pelas cultivares Olinda, Cinderela e Veneranda.

Tabela 4 – Teor de ácido ascórbico (AA), pH do extrato foliar (pH), sólidos solúveis totais (SST), acidez titulável (AT) e relação de sólidos solúveis e acidez titulável (SST/AT) obtidos da avaliação de folhas de alface cultivadas em sistema hidropônico sob condição de temperatura elevada.

Cultivares	AA (mg 100 g ⁻¹)	pH	SST (%)	AT (% de ácido cítrico)	SST/AT (%)
Veneranda	19,565 ± 1,537 a	6,303 ± 0,057 a	4,113 ± 0,144 c	0,112 ± 0,004 b	36,771 ± 2,307 b
Cristina	18,844 ± 1,847 b	6,250 ± 0,188 a	4,750 ± 0,443 b	0,106 ± 0,012 b	45,774 ± 9,768 a
Olinda	21,014 ± 1,025 a	6,020 ± 0,094 b	5,300 ± 0,082 a	0,130 ± 0,006 a	40,975 ± 2,301 a
Mônica	18,478 ± 0,887 b	5,840 ± 0,078 c	4,425 ± 0,126 c	0,139 ± 0,012 a	32,058 ± 2,423 b
Cinderela	19,927 ± 0,512 a	6,100 ± 0,138 a	4,050 ± 0,191 c	0,093 ± 0,008 c	43,813 ± 3,054 a
Grand Rapids	17,754 ± 0,512 b	6,188 ± 0,177 a	4,350 ± 0,196 c	0,114 ± 0,021 b	39,476 ± 8,811 b
Itapuã Super	17,753 ± 0,512 b	6,100 ± 0,177 a	4,300 ± 0,346 c	0,098 ± 0,010 c	44,163 ± 2,415 a
Crocantela	18,841 ± 0,512 b	6,128 ± 0,052 a	3,350 ± 0,191 d	0,085 ± 0,006 c	39,563 ± 1,696 a
Simpson Black Seed	18,840 ± 1,025 b	6,208 ± 0,050 a	3,100 ± 0,258 d	0,096 ± 0,019 c	33,065 ± 5,613 b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula dentro da coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade, indicando similaridades entre os grupos.

Para o pH do extrato foliar (pH) foram observadas diferenças entre as cultivares, com valores entre 5,84 e 6,30, indicando a influência da variabilidade genética nesta variável. Ainda, foram obtidos valores médios acima de pH 6 para todas as cultivares avaliadas, com exceção à cultivar Mônica.

Em relação aos sólidos solúveis totais (SST), foi observado maior teor nas folhas das cultivares Olinda, sendo este superior ao observado nas demais cultivares avaliadas. Destaca-se ainda, os teores encontrados nas cultivares Crocantela e Simpson Black Seed, que foram mais baixos do que as cultivares que pendoaram.

Para acidez titulável (AT), foram observados nas folhas das alfaces valores entre 0,085 e 0,139% de ácido cítrico, com maiores teores nas cultivares Mônica e Olinda. As cultivares Cristina, Veneranda e Grand Rapids apresentaram teores similares e, das cultivares que

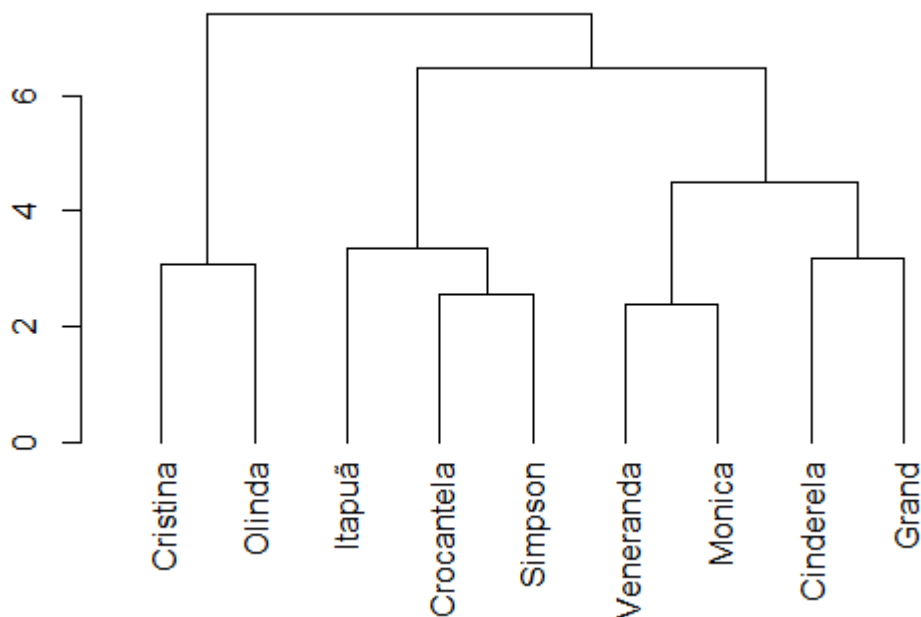
pendoaram, apenas a cultivar Cinderela foi englobada no grupo de menor teor de acidez nas folhas.

No que tange ao sabor das folhas, a relação SST/AT evidenciou o efeito do pendoamento na qualidade das alfaces, uma vez que as cultivares Mônica, Grand Rapids e Veneranda apresentaram juntamente com a cultivar Simpson Black Seed, menor desempenho neste parâmetro. Para este parâmetro, foram formados dois grupos, com melhor desempenho englobando as cultivares Cristina, Itapuã Super, Cinderela, Olinda e Crocantela, com média de 42,86 % e com menor relação SST/AT, as cultivares Mônica, Simpson Black Seed, Veneranda e Grand Rapids, com média de 35,34%.

Classificação das cultivares com base em sua aptidão

Neste sentido, em função dos comportamentos observados, o método “K-means” de agrupamento foi utilizado, prefixando a formação de três grupos de desempenho, considerando no modelo as variáveis de crescimento, produção, fisiologia e pós-colheita, foram evidenciados três grupos de desempenho (Figura 4).

Figura 4 – Análise de agrupamento “cluster” dos cultivares de alface cultivadas em hidroponia sob elevada temperatura.



Os grupos de aptidão formados foram denominados de “elevada”, “média” e “baixa” tolerância a condição de temperatura elevada. Logo, considerando os resultados obtidos, englobou no grupo de elevada aptidão as cultivares Olinda e Cristina, uma vez que estes materiais apresentaram tolerância ao pendoamento, além de elevada produção e qualidade pós-colheita. O grupo de média aptidão, por sua vez englobou as cultivares que apresentaram tolerância ao pendoamento, contudo, apresentaram limitações produtivas. Já o grupo de baixa aptidão, englobou as cultivares que apresentaram indícios pendoamento precoce e baixa produção.

DISCUSSÃO

O pendoamento e adaptabilidade da cultivar afetam a capacidade produtiva da alface

Foram observados efeitos do pendoamento precoce no crescimento e produção das cultivares Mônica, Veneranda, Cinderela e Grand Rapids, sendo isto evidenciado pelas maiores médias de H e redução de D. Quando a temperatura de cultivo é superior à 30°C, a alface apresenta tendência de pendoar (LIU et al., 2020), sendo tanto altura quanto o diâmetro do caule, parâmetros indicadores da resistência do material genético ao pendoamento precoce (LUZ et al., 2009; LEMOS NETO et al., 2017; DE MENEZES FORTES et al., 2020). Logo, no que tange a resistência ao pendoamento as cultivares Crocantela, Itapuã Super, Cristina, Olinda e Simpson Black Seed se destacaram, uma vez que apresentaram valores menores para H e D superior as das cultivares que apresentaram indícios de pendoamento.

Ainda em relação a tolerância ao pendoamento, devem ser ainda considerada a idade ao até o pendoamento observadas nas cultivares avaliadas (LEMOS NETO et al., 2017), juntamente com o grau de pendoamento. Logo, dentre as cultivares avaliadas, a cultivar Mônica foi a que apresentou menor tolerância, uma vez que iniciou o pendoamento com menor idade (36 dias) e apresentou grau 2.

Considerando os aspectos produtivos apenas as cultivares Olinda, Cristina e Mônica apresentaram desempenho produtivo de destaque, em relação a NF. Para as cultivares pendoadas, o desempenho inferior em NF pode ser atribuído à expressão do pendoamento precoce, fazendo com que a planta priorize a formação da estrutura reprodutiva em detrimento ao crescimento vegetativo, reduzindo desta forma, o acúmulo de biomassa foliar (PESSARAKLI, 2014).

Contudo, mesmo não apresentando indícios de pendoamento, as cultivares Crocantela, Simpson Black Seed e Itapuã Super, apresentaram baixo desempenho em termos de número de folhas, área foliar e acúmulo de biomassa fresca e seca de folhas, similar as cultivares pendoadas, o que indica que estes aspectos produtivos podem ter sido afetados por questões genéticas e de adaptação destes materiais as condições ambientais e sistema de cultivo.

Avaliando o cultivo das cultivares de alfaces mimosa verde e mimosa roxa em sistema convencional e hidropônico, Rosa et al., (2014) verificou desempenho superior em relação ao acúmulo de biomassa no sistema de cultivo hidropônico. Além disto, há a questão da adaptação da planta ao clima da área de cultivo, fator que é influenciado pelo genótipo da cultivar. Souza et al., (2019), avaliando o desempenho da cultivar Crocantela no Sul do Brasil em região com temperatura máxima durante o ensaio experimental de 26,4 °C, verificou maiores valores para a produção de biomassa do que foi observando no presente estudo, indicando o efeito do clima no desempenho da cultivar.

O pendoamento afetou a biomassa fresca e seca do caule das cultivares de alface, uma vez que as cultivares pendoadas apresentaram maior massa quando em comparação com os demais materiais avaliados. A massa similar obtida pela cultivar Olinda foi atribuída em função de uma característica genética do material, o qual apresenta diâmetro elevado para sustentar uma quantidade maior de folhas. Além disso, esse material genético ainda apresentou bom desenvolvimento radicular (fresco e seco), indicando boa adaptabilidade em condição de temperatura elevada.

O crescimento sadio do sistema radicular é um aspecto de importância no cultivo hidropônico de plantas, uma vez que as raízes são órgãos sensíveis a fatores externos, tais como temperatura, salinidade e oxigenação (ALBERONI, 1995; HECKATHORN et al., 2013). Além disso, o crescimento e qualidade final das plantas é diretamente afetado pelo funcionamento das raízes, uma vez que estas são responsáveis por processos como a absorção de água e íons, respiração e assimilação de nutrientes (TAIZ et al., 2017).

Estes resultados demonstram a maior tolerância e adaptabilidade das cultivar Olinda e Cristina a climas quentes, de forma que estas não apresentaram indícios de pendoamento e, ainda, apresentaram produção e acúmulo de massa superiores.

O teor de pigmentos não influenciou na expressão do pendoamento precoce

Os pigmentos fotossintéticos são fundamentais para o processo fotossintético, sobretudo na etapa fotoquímica, onde a clorofila *a* atua efetivamente, com auxílio de pigmentos acessórios como a clorofila *b* e os carotenoides, que atuam na absorção e transferência da energia luminosa para os centros de reação (TAIZ et al., 2017). Isto condiciona a essencialidade destes no processo de assimilação de CO₂, contribuindo para síntese de esqueletos de carbono que sustentam a biomassa vegetal (TAIZ et al., 2017).

Além disso, os carotenoides desempenham uma função de proteção dos cloroplastos contra espécies reativas de oxigênio (YOUNG, 1991; PESSARAKLI, 2014). Neste sentido, levantou-se a hipótese de que as cultivares com menor teor desses pigmentos apresentariam maior tendência a expressar o pendoamento, em função destes atuarem como componentes dos complexos não enzimáticos do sistema de defesa antioxidativa da planta (YOUNG, 1991; LANFER-MARQUEZ; BARROS; SINNECKER, 2005; PESSARAKLI, 2014). Contudo, o desempenho das cultivares Simpson, Itapuã Super e Cristina, apontam que o teor de clorofilas não foi determinante para a não expressão do pendoamento.

Desta forma, estes resultados indicam que o teor de clorofilas e carotenoides apesar de indicarem uma maior adaptabilidade da planta a um ambiente estressor, não afetam a capacidade de expressão do pendoamento precoce em condição de temperatura elevada, estando essa característica relacionada a fatores genéticos intrínsecas as cultivares.

O desempenho fisiológico foi afetado pelo pendoamento precoce e adaptabilidade das cultivares

O desempenho fisiológico vegetal é altamente influenciado pelas condições ambientais, estando a adaptabilidade da planta relacionada principalmente a suas características genéticas (TAIZ et al., 2017), o que confere comportamentos variáveis de cultivares ou genótipos de uma mesma espécie quando submetidos a condições climáticas similares (LEMOS NETO et al., 2017; DE MENEZES FORTES et al., 2020).

Observamos que a limitação na *Pn* para as cultivares Veneranda e Simpson pode estar relacionada a fatores bioquímicos, uma vez que estas apresentam *Ci* elevado e *gs* estável, indicando que o CO₂ que chega às células do mesófilo foliar não está a ser assimilado, devido a fatores intrínsecos e/ou extrínsecos à planta (TAIZ et al., 2017). Padrão similar foi observado para a cultivar Cinderela, contudo, não observamos limitação no fornecimento de CO₂, apesar

da menor g_s . A acumulação de CO_2 na câmara estomática indica desequilíbrios metabólicos, tais como a limitação da regeneração da enzima Rubisco (ribulose-1,5 bifosfato), ocasionando a redução da fotossíntese líquida (FERNANDES; CAIRO; NOVAES, 2015). Em função destas questões estas cultivares foram a que apresentaram menor WUE .

É sabido que a fotossíntese é um processo altamente termossensível (PESSARAKLI, 2014), e no caso da cultivar Grand Rapids, a limitação nas trocas gasosas apresentada pode estar relacionada a este fator, uma vez que nesta foi assinalada a maior temperatura foliar. Em função disto, a Grand Rapids teve a P_n reduzida em função da limitação do substrato para a atividade fotossintética (CO_2), estando isto evidente na baixa g_s e E . A cultivar Mônica, assim como todas as cultivares pendoadas, apresentou menor P_n que as demais cultivares (com exceção a cultivar Simpson) e similar, não sendo observadas limitações aparentes em relação a abertura estomática ou a assimilação do CO_2 , o que reforça o efeito limitante do pendramento em relação a capacidade fotossintética.

Uma vez iniciada a fase reprodutiva das plantas, ocorre uma modificação na estratégia de funcionamento metabólico, resultando na modificação em processos de partição de fotoassimilados e remobilização de nutrientes das raízes e folhas para subsidiar o crescimento, desenvolvimento e maturação da estrutura floral, conseqüentemente, reduzindo a eficiência da atividade fotossintética (PESSARAKLI, 2014; TAIZ et al., 2017). Abdelmageed & Gruda (2009), observaram decréscimo na atividade fotossintética de cultivares de tomate sob estresse térmico, onde a assimilação de CO_2 das plantas foi diminuindo a medida em que a planta se aproxima do florescimento e frutificação.

O caso da cultivar Simpson indica uma ausência de adaptação ao ambiente e sistema de cultivo, o que resultou em um desempenho produtivo e fisiológico inferior. Em relação a elevada P_n da cultivar Itapuã Super, esta pode ser atribuída a elevada g_s e do funcionamento bioquímico do aparato fotossintético, uma vez que não foi observado acúmulo de CO_2 , contrastando com o que foi observado para a cultivar Veneranda. Contudo, em virtude da grande abertura estomática, esta cultivar apresentou também elevada transpiração, e conseqüentemente, teve sua WUE afetada negativamente.

Contudo, conforme observado por Menezes Fortes et al., (2020) para as cultivares “Isabela” e “Crespa para Verão”, apesar de apresentar P_n mais elevada dentre as cultivares avaliadas, a Itapuã Super aparenta uma menor eficiência produtiva do que as cultivares Olinda e Cristina, o que indica que esta cultivar pode apresentar elevado consumo de carboidratos no

processo de respiração, o que justifica o menor acúmulo de massa por esse material. No tocante a eficiência produtiva, destaca-se a cultivar Cristina, a qual apresentou P_n similar a pendoada cultivar Mônica, contudo, com um elevado desempenho produtivo.

A cultivar Olinda, apresentou elevada P_n e g_s , além de ter apresentado menor transpiração, temperatura da folha e conseqüentemente, maior WUE . Isto indica uma planta que apresenta mecanismos eficientes de uso da água, sobretudo no que tange a manutenção da temperatura foliar, garantindo o pleno funcionamento bioquímico e estabilidade do aparato fotossintético (TAIZ et al., 2017). A manutenção da temperatura interna da folha por sua vez é um mecanismo primordial de tolerância ao estresse térmico, uma vez que os processos enzimáticos realizados nas folhas são modulados pela temperatura, de forma que, com a elevação desta, algumas enzimas tem sua atividade reduzida ou totalmente inibida por desnaturação térmica (PESSARAKLI, 2014; TAIZ et al., 2017). Logo, este pleno funcionamento fisiológico associado a elevados teores de pigmentos fotossintéticos resultou em um ótimo desempenho produtivo desta cultivar, indicando a elevada aptidão em condição de elevada temperatura.

O pendoamento reduz a SST e afeta a qualidade pós-colheita das cultivares de alface

O ácido ascórbico no metabolismo vegetal tem seu papel destacado em amenizar os efeitos do peróxido de hidrogênio – H_2O_2 , sendo sua atuação junto a glutatona primordial para a eficiência dos complexos não enzimáticos de resposta antioxidante (FOYER; NOCTOR, 2005; PACIOLLA et al., 2019), indicando um possível mecanismo empregado pelas cultivares Olinda e Cristina. Contudo, para a cultivar Veneranda, este mecanismo se demonstrou pouco eficiente, em função da limitação estomática da atividade fisiológica.

Além disto, é uma característica de interesse para o mercado consumidor, uma vez que este antioxidante está relacionado ao funcionamento fisiológico do sistema nervoso, o que qualifica ainda mais estas cultivares para o mercado consumidor (FIGUEROA-MÉNDEZ; RIVAS-ARANCIBIA, 2015).

A maioria das cultivares avaliadas se agrupou em um mesmo grupo em relação ao pH, o que representa um forte indício desta variável estar relacionada à características genéticas. A cultivar Olinda foi encaixada em um grupo de teor inferior, sendo superior em pH apenas em relação a cultivar Mônica. A digestibilidade das folhas apresenta correlação positiva com o pH

das folhas em algumas espécies, logo, à medida que este se eleva, mais facilitada é a digestão da mesma (CORNELISSEN et al., 2006). Neste sentido, dentre as cultivares avaliadas, a cultivar Mônica apresentou menor digestibilidade.

Han et al. (2013), avaliando o estresse térmico em cultivares de alface cultivadas em câmara de crescimento, observaram maiores taxas de açúcares totais nos genótipos que apresentaram menor taxa de peroxidação lipídica, podendo desta forma, ser um indicador de adaptabilidade desta cultura a regiões de clima quente. Além disto, em virtude de sua relação com os açúcares, o SST tem sido atribuído como um fator que confere tempo de prateleira de produtos vegetais (CHITARRA & CHITARRA, 2005; REIS et al., 2014), sendo portanto, mais uma característica de interesse para o mercado.

Observamos que as cultivares pendoadas apresentaram um teor de SST inferior a Cristina e Olinda, estando acima apenas das cultivares Crocantela e Simpson. Vale ressaltar que isto pode estar relacionada ao desempenho fisiológico da cultivar Simpson, bem como das características intrínsecas as cultivares. Souza et al. (2019), avaliando o desempenho da cultivar Crocantela em diferentes sistemas de cultivo em Florianópolis-SC observou maior conteúdo de açúcares nas folhas desta quando cultivada em solo, indicando que o SST para esta cultivar no presente estudo pode ter sido afetado pelo sistema de cultivo.

O teor da AT interfere negativamente na palatabilidade dos produtos vegetais, porém, contribui para tornar o material vegetal resistente à degradação microbiológica, aumentando o tempo de prateleira (CHITARRA & CHITARRA, 2005; SAMPAIO et al., 2021). Indicando outra característica interessante em relação a comercialização da cultivar Olinda.

A relação SST/AT, apresenta um indicativo de palatabilidade das hortaliças (CHITARRA & CHITARRA, 2005). Logo, observamos que o pendoamento influenciou na palatabilidade das alfaces, uma vez que as cultivares pendoadas foram englobadas no mesmo grupo com menor relação SST/AT. Este efeito pode ser atribuído ao fato do pendoamento promover a produção de látex pela alface, o que confere o amargor no sabor das folhas e conseqüentemente, reduzindo sua qualidade comercial (ALBERONI, 1998; LUZ et al., 2009).

Aptidão das cultivares a condição de temperatura elevada

Neste sentido, considerando os aspectos de crescimento, produção, fisiologia, pigmentos e pós-colheita, o modelo de agrupamento com três grupos pré-definidos indicou

dentro das cultivares avaliadas para expansão da produtividade e qualidade da alfacicultura hidropônica em regiões de climas quentes, as cultivares Olinda e Cristina, as quais despontaram como cultivares do tipo crespa de aptidão de cultivo na região e que podem atender as demandas de públicos distintos, em função de sua diferença de intensidade da coloração verde das folhas (SILVA; FERREIRA; FERREIRA, 2016).

A cultivar Olinda apresentou bom desempenho produtivo, ausência de inibições de cunho bioquímico e fisiológico, além de apresentar características de interesse para o mercado consumidor, como é o caso do potencial antioxidante. Outro aspecto de destaque para a cultivar Olinda foi o elevado teor de clorofila total, resultando em folhas de coloração verde mais intensa, o que contempla um nicho de mercado que demanda produtos funcionais com maior qualidade nutracêutica (SALA; DA COSTA, 2012; SANTOS et al., 2021), uma vez que estes pigmentos possuem propriedades antioxidantes e anti-inflamatória (ANTONIO; VIERA, 2020). A cultivar Cristina, por outro lado, representa uma opção mais “tradicional” ao mercado consumidor no qual já existe uma demanda por alfaces crespas de coloração verde mais clara (SALA; DA COSTA, 2012).

CONCLUSÃO

As cultivares de alface Olinda e Cristina foram as que apresentaram melhor desempenho produtivo e qualidade pós-colheita em condição de elevada temperatura. As cultivares Itapuã Super, Crocantela e Simpson, apresentaram desempenho intermediário; Veneranda, Mônica, Grand Rapids e Cinderela apresentaram baixo desempenho produtivo

Logo, as cultivares Olinda e Cristina se destacaram para o cultivo de alface em condições de elevadas temperaturas. Estas duas apresentam características sensoriais diferentes, podendo ser a cultivar Olinda ser comercializada em mercados com demandas de alimentos ricos em compostos antioxidantes, enquanto a cultivar Cristina apresenta aspecto visual que atende as demandas do mercado. Além disto, o pendoamento precoce limitou as trocas gasosas e qualidade pós-colheita das alfaces. Observamos ainda que o teor de pigmentos não foi determinante para a expressão do pendoamento, estando isto relacionado as características genéticas da cultivar.

REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELMAGEED, A. H. A.; GRUDA, N. Influence of high temperatures on gas exchange rate and growth of eight tomato cultivars under controlled heat stress conditions. **European Journal of Horticultural Science**, v. 74, n. 4, p. 152, 2009.
- ALBERONI, R. B. **Hidroponia: Como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo**. Editora Nobel. São Paulo-SP. 102 p. 1998.
- AL MAHMUD, A. *et al.* Selection of Suitable Potato Genotypes for Late-Sown Heat Stress Conditions Based on Field Performance and Stress Tolerance Indices. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2770. 2021.
- ALLAKHVERDIEV, S. I. *et al.* Heat stress: An overview of molecular responses in photosynthesis. **Photosynthesis Research**, v. 98, n. 1–3, p. 541–550, 2008.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANTONIO, P.; VIERA, I. Carotenoids and Chlorophylls as Antioxidants. **Antioxidants**, v. 9, n. 505, p. 34, 2020.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemistry**. Washington: AOAC, 2012.
- BATISTA, T. *et al.* Avaliação nutricional da alface cultivada em soluções nutritivas suprimidas de macronutrientes. **Revista Biotemas**, v. 24, n. 2, p. 2175–7925, 2011.
- CAMEJO, D. *et al.* High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. **Journal of Plant Physiology**, v. 162, n. 3, p. 281–289, 2005.
- CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: Editora UFLA, 2005.
- CORNELISSEN, J. H. C. *et al.* Foliar pH as a new plant trait: Can it explain variation in foliar chemistry and carbon cycling processes among subarctic plant species and types? **Oecologia**, v. 147, n. 2, p. 315–326, 2006.
- DE MENEZES FORTES, J. F. *et al.* Productive and physiological performance of lettuce cultivars under hydroponic cultivation in the semi-arid region of the Northeast. **Revista Agro@mbiente on-Line**, v. 14, 2020.
- FARHAT, N. *et al.* Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, n. 6, p. 145, 17 jun. 2016.
- FERNANDES, E. T.; CAIRO, P. A. R.; NOVAES, A. B. De. Respostas fisiológicas de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. **Ciência Florestal**, v. 45, n. 1, p. 29–34, 2015.
- FIGUEROA-MÉNDEZ, R.; RIVAS-ARANCIBIA, S. Vitamin C in health and disease: Its role in the metabolism of cells and redox state in the brain. **Frontiers in Physiology**, v. 6, p. 397, 2015.

- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: A metabolic interface between stress perception and physiological responses. **Plant Cell**, v. 17, n. 7, p. 1866–1875, 2005.
- GIRI, A. *et al.* Heat stress decreases levels of nutrient-uptake and assimilation proteins in tomato roots. **Plants**, v. 6, n. 1, p. 443–448, 2017.
- HAN, Y. *et al.* Effect of heat stress on the MDA, proline and soluble sugar content in leaf lettuce seedlings. **Agricultural Sciences**, v. 04, n. 05, p. 112–115, 2013. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/as.2013.45B021>>.
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The Water-culture Method for Growing Plants Without Soil. Circular. **California Agricultural Experiment Station**, v. 347, n. 2, p. 32, 1950.
- HOLMES, S. C. *et al.* Selection of heat tolerant lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars grown in deep water culture and their marketability. **Horticulturae**, v. 5, n. 3, p. 1–11, 2019.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p
- LANFER-MARQUEZ, U. M.; BARROS, R. M. C.; SINNECKER, P. Antioxidant activity of chlorophylls and their derivatives. v. 38, p. 885–891, 2005.
- LEMO NETO, H. *et al.* Productive and physiological performance of lettuce cultivars at different planting densities in the Brazilian Semi-arid region. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 10, p. 771–779, 2017.
- LIU, R. *et al.* LsHSP70 is induced by high temperature to interact with calmodulin, leading to higher bolting resistance in lettuce. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2020.
- LUZ, A. O. da *et al.* Resistência ao pendoamento de genótipos de alface em ambientes de cultivo. **Agrarian**, v. 2, n. 6, p. 71–82, 2009.
- PACIOLLA, C. *et al.* Vitamin C in Plants: From Functions to Biofortification. **Antioxidants**. Vol. 8, Page 519, v. 8, n. 11, p. 519. 2019.
- PESSARAKLI, M. **Handbook of Plant and Crop Physiology**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2014. v. 3
- REIS, H. F. *et al.* Conservação pós-colheita de alface crespa, de cultivo orgânico e convencional, sob atmosfera modificada. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 3, p. 303–309, 2014.
- ROSA, A. M. *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.
- SALA, F. C.; DA COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacultura Brasileira. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 187–194, 2012.
- SAMPAIO, I. M. G. *et al.* Production and postharvest quality of jambu in hydroponics under nitrogen application in nutrient solution. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 2, p. 1–8, 2021.

- SANTOS, C. P. dos *et al.* Morphological evaluation of lettuce genotypes grown under hydroponic system. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 312–318, 2021.
- SIDDIQUI, M. H. *et al.* Morphological and physiological characterization of different genotypes of faba bean under heat stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 22, n. 5, p. 656–663, 2015.
- SILVA, E. C. *et al.* Inheritance of bolting tendency in lettuce *Lactuca sativa*. n. 1979, p. 1–7, 1999.
- SILVA, E.; FERREIRA, E. A.; FERREIRA, M. R. Desempenho da alface americana sob a aplicação de adubos químico e orgânico. **Ciência Et praxis**, v. 09, p. 21–24, 2016.
- SOUZA, M. da C. M. de. Variabilidade genética e caracterização agrônômica de progênies de alface tolerantes ao calor. 2006.
- SOUZA, P. F. de *et al.* Physiological differences of ‘Crocantela’ lettuce cultivated in conventional and hydroponic systems. **Horticultura Brasileira**, v. 37, n. 1, p. 101–105, 2019.
- STROHECKER R.; HENNING H. M. Analisis de vitaminas: métodos comprovados. Madri: Paz Montalvo. 1967.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. [s.l.] Artmed Editora, 2017.
- WAHID, A. *et al.* Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, n. 3, p. 199–223, 2007.
- YOUNG, A. J. The photoprotective role of carotenoids in higher plants. **Physiologia Plantarum**, v. 83, n. 4, p. 702–708, 1991.

CONCENTRAÇÃO DE MAGNÉSIO AFETA A PRODUÇÃO, DESEMPENHO FISIOLÓGICO E BIOQUÍMICO EM CULTIVARES DE ALFACE CULTIVADAS EM CONDIÇÃO DE ELEVADAS TEMPERATURAS

RESUMO

A alface (*Lactuca sativa*) é uma das culturas mais consumidas no mundo e no Brasil possui elevada relevância econômica e social, sendo cultivada em todo o território brasileiro. Contudo, em regiões de climas quentes, a qualidade e produção desta cultura tende a decrescer. Quando cultivada em ambientes quentes, a alface tende a apresentar desordens fisiológicas, as quais reduzem a qualidade e produtividade da alface em função do pendoamento precoce. Este trabalho tem como hipótese, de que a suplementação adequada de magnésio atenua o pendoamento precoce e melhora a produção e qualidade de cultivares de alface. Logo, o objetivamos avaliar o desempenho produtivo, fisiológico, bioquímico e de qualidade pós-colheita de duas cultivares de alface, sendo uma tolerante e outra susceptível ao pendoamento precoce sob temperatura elevada. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado organizado em esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco níveis de magnésio (0,01, 0,5, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹) em solução nutritiva de Hoagland & Arnon e duas cultivares (Olinda e Mônica). As alfaces foram cultivadas em sistema hidropônico “Deep Film Technique” (DFT) com aeração forçada. As plantas foram avaliadas em relação ao seu desempenho bioquímico, fisiológico, produtivo e de qualidade pós-colheita. A concentração de Mg reduziu a atividade das enzimas catalase (CAT) e peroxidase do guaiacol (GPX), com menor atividade destas respectivamente em 2,22 e 3,00 mmol L⁻¹ para Olinda e 3,07 e 4 mmol L⁻¹, resultando em decréscimos lineares no extravasamento de eletrólitos das folhas para ambas as cultivares. O teor de pigmentos fotossintético também foi afetado pela concentração de Mg. Contudo, a concentração de Mg não inibiu a expressão de pendoamento precoce na cultivar Mônica. *Pn*, *Pn/Ci*, *WUE* apresentaram valores máximos positivos respectivamente nas concentrações de 2,44, 2,35 e 2,17 mmol L⁻¹ para Olinda e 2,58, 2,42 e 2,51 mmol L⁻¹ para Mônica. Além disso, em ambas as cultivares as variáveis de crescimento e acúmulo de massa também foram explicadas por modelos quadráticos, com exceção da massa fresca de raiz (MFR) na cultivar Mônica. Em relação a qualidade pós-colheita, o efeito da concentração de Mg nas variáveis SST e SST/AT foram explicados por modelos quadráticos. As variáveis *gs*, pH, *E* e AT (esta última, somente para cultivar Mônica), não foram influenciadas pelo fornecimento de Mg. Em análise geral, a cultivar Olinda apresentou desempenho superior em todos os aspectos avaliados quando comparada a cultivar Mônica. O Mg promove incrementos na capacidade de resposta

antioxidante, desempenho fotossintético, crescimento e produção das cultivares de alface, com concentrações críticas estimadas de 2,44 mmol L⁻¹ e 2,92 mmol L⁻¹, respectivamente para as cultivares Olinda e Mônica.

Palavras-chave: Magnésio; Produção e qualidade; Alface; Hidroponia.

MAGNESIUM CONCENTRATION AFFECTS PRODUCTIVITY, PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PERFORMANCE IN LETTUCE CULTIVARS GROWN IN HIGH TEMPERATURE CONDITION

ABSTRACT

Lettuce (*Lactuca sativa*) is one of the most consumed crops in the world and in Brazil it has high economic and social relevance, being cultivated throughout the Brazilian territory. However, in regions with hot climates, the quality and production of this crop tends to decrease. When grown in hot environments, lettuce tends to present physiological disorders, which reduce the quality and productivity of lettuce due to early bolting. This work hypothesizes that adequate magnesium supplementation attenuates bolting and improves yield and quality of lettuce cultivars. Therefore, we aimed to evaluate the productive, physiological, biochemical and post-harvest quality performance of two lettuce cultivars, one being tolerant and the other susceptible to early bolting under high temperature. The experimental design used was completely randomized, organized in a 5 x 2 factorial scheme, with five levels of magnesium (0.01, 0.5, 1, 2 and 4 mmol L⁻¹) in Hoagland & Arnon nutrient solution and two cultivars (Olinda and Monica). The lettuces were grown in a “Deep Film Technique” (DFT) hydroponic system with forced aeration. The plants were evaluated in relation to their biochemical, physiological, productive and post-harvest quality performance. The concentration of Mg reduced the activity of the enzymes catalase (CAT) and guaiacol peroxidase (GPX), with lower activity of these respectively in 2.22 and 3.00 mmol L⁻¹ for Olinda and 3.07 and 4 mmol L⁻¹ for Monica, resulting in linear decreases in leaf electrolyte leakage for both cultivars. Photosynthetic pigment content was also affected by Mg concentration. However, the concentration of Mg did not inhibit the expression of bolting in cultivar Monica. Pn, Pn/Ci, WUE showed maximum positive values respectively at concentrations of 2.44, 2.35 and 2.17 mmol L⁻¹ for Olinda and 2.58, 2.42 and 2.51 mmol L⁻¹ for Monica. Furthermore, in both cultivars the growth and mass accumulation variables were also explained by quadratic models, with the exception of root fresh mass (MFR) in cultivar Monica. Regarding post-harvest quality, the effect of Mg concentration on SST and SST/AT variables was explained by quadratic models. The variables *gs*, pH, E and AT (the latter, only for cultivar Monica) were not influenced by the supply of Mg. In general analysis, cultivar Olinda showed superior performance in all evaluated aspects when compared to cultivar Monica. Mg promotes increases in the antioxidant response capacity, photosynthetic performance, growth and

production of lettuce cultivars, with estimated critical concentrations of 2.44 mmol L⁻¹ and 2.92 mmol L⁻¹, respectively, for the cultivars Olinda and Monica.

Keywords: Magnesium; Production and quality; Lettuce; Hydroponics.

INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa*) é uma das culturas mais consumidas no mundo e no Brasil possui elevada relevância econômica e social, sendo cultivada em todo o território nacional (SALA; COSTA, 2012; COMETTI et al., 2016). Contudo, em regiões de climas quentes, a qualidade e produção desta cultura tende a decrescer. Tal decréscimo está relacionado ao fato da alface ser uma cultura termosensível, com temperaturas ótimas de desenvolvimento entre 17 a 28 °C (HOLMES et al., 2019).

Em regiões de climas quentes a alface tende a apresentar desordens fisiológicas como o pendoamento precoce (HOLMES et al., 2019; DE MENEZES FORTES et al., 2020), colocando em risco a produção desta hortaliça nestas regiões (WAHID et al., 2007), uma vez que pendoamento precoce afeta o aspecto visual da planta, reduzindo a quantidade e qualidade das folhas produzidas, em função do acúmulo de látex (ALBERONI, 1998).

De acordo com Liu et al. (2020), o pendoamento precoce na alface é expressado por meio de genes que são ativados como resultante do estresse oxidativo causado pelo calor. Para neutralizar os danos oriundos do estresse, as plantas reagem por meio de complexos, os quais podem ser enzimáticos ou não enzimáticos (PESSARAKLI, 2014; DA SILVA et al., 2017). A atuação destes complexos e, conseqüentemente, a tolerância ao estresse térmico são dependentes do material genético da planta (AHN; CLAUSSEN; ZIMMERMAN, 2004; CAMEJO et al., 2005; AL MAHMUD et al., 2021), bem como das condições de cultivo a qual estão submetidos.

Neste sentido, a suplementação com magnésio (Mg) tem sua importância destacada, atuando de forma versátil na mitigação de estresses oxidativos, favorecendo o desempenho dos complexos enzimáticos e não enzimáticos (MARSCHNER, 2012; DA SILVA et al., 2017; SIDDIQUI et al., 2018). Ainda, este nutriente atua na síntese de clorofilas, translocação de fotoassimilados, além de estabilizar membranas e ativar diversas enzimas como as ATP'ases e a Rubisco, favorecendo por tanto, o desempenho fisiológico e fixação de carbono pela planta (CAKMAK; YAZICI, 2010; MARSCHNER, 2012; TRÄNKNER et al., 2016; TRÄNKNER; TAVAKOL; JÁKLI, 2018).

Avaliando a suplementação de Mg em plantas de *Vicia faba* sob estresse térmico Siddiqui et al. (2018) observaram que a nutrição adequada com Mg promoveu redução do extravasamento de eletrólitos, da degradação de clorofilas, do conteúdo de ERO, além de melhorar a atividade das enzimas Rubisco, catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e

peroxidase (POD). Ainda, os autores observaram que as plantas sob estresse apresentaram melhor crescimento quando suplementadas com Mg em comparação com as que não receberam suplementação sob estresse.

Contudo, em muitas situações o Mg acaba tendo suas funções e fornecimento negligenciado nos sistemas de cultivo, sendo considerado na literatura como um “nutriente esquecido”, o que ocasiona a não contemplação do estado nutricional das plantas e, conseqüentemente, a ocorrência de redução de produção e qualidade (CAKMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994; CAKMAK; YAZICI, 2010). Assim sendo, este trabalho tem como hipótese, de que a suplementação adequada de magnésio atenua o pendoamento precoce e melhora a produção e qualidade de cultivares de alface. Logo, objetivamos avaliar o desempenho produtivo, fisiológico, bioquímico e de qualidade pós-colheita de duas cultivares de alface, sendo uma tolerante e outra susceptível ao pendoamento precoce em região de temperatura elevada.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e delineamento experimental

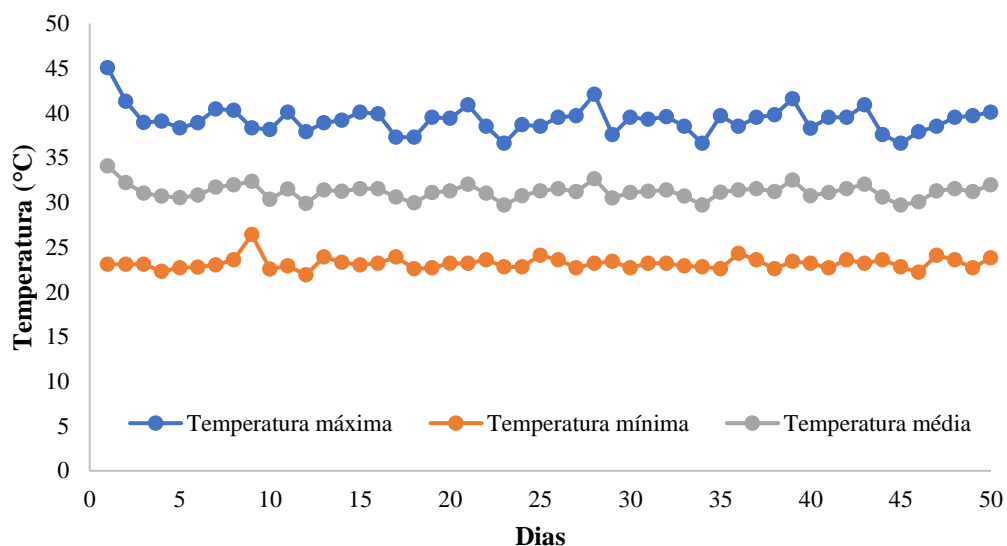
O experimento foi realizado no período entre 16 de agosto e 28 de setembro de 2021, sendo conduzido em condições de casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo, no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia (ICA-UFRA), campus Belém-PA (1°28'S, 48°30'W, 9 m de altitude). O clima da localidade do experimento é classificado por Köppen como “Afi”, com temperatura média superior a 26 °C e precipitação anual de 3100 mm (ALVARES et al., 2013).

Durante a condução do experimento, foram monitoradas, a temperatura, umidade relativa do ar e intensidade luminosa da casa de vegetação por meio de um termo higrômetro (Figura 6) e luxímetro. Observou-se amplitude térmica variando em média de 39,23 °C (temperatura máxima) e 23,35 °C (temperatura mínima) com médias de temperatura e umidade relativa do ar de 31,29 °C e 63,55%, respectivamente (Figura 5). A média de luminosidade foi de 573,19 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e a temperatura das soluções nutritivas foi em média de $29,8 \pm 1,64$ °C.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado organizado em esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco níveis de Mg em solução nutritiva (0,01, 0,5, 1, 2 e 4 mmol L⁻¹) e duas cultivares (Olinda e Mônica). Cada tratamento foi composto de cinco repetições, perfazendo um total de 50 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi composta

por uma planta de alface. As cultivares tem como distinção entre si, a tolerância ao estresse térmico e ao pendoamento precoce, sendo a cultivar Olinda considerada de elevada aptidão e a cultivar Mônica como de baixa aptidão e susceptível ao pendoamento precoce.

Figura 5 – Médias de temperatura no interior da casa de vegetação durante o experimento.



As mudas foram produzidas através de semeio em bandejas de poliestireno (128 células) preenchidas com substrato fibra de coco. Realizou-se semeadura na densidade de três sementes por célula. O substrato teve a umidade mantida utilizando água destilada para a rega. Após sete dias após a semeadura (DAS), realizou-se o desbaste, mantendo apenas a plântula mais vigorosa. Posteriormente, as bandejas foram transferidas para bancadas do tipo berçário, onde foram submetidas a fertirrigação com solução nutritiva na formulação 2 de Hoagland & Arnon (1950), à 25% da força iônica.

O transplântio das mudas para o sistema hidropônico ocorreu 20 DAS, quando as plantas apresentavam 4 folhas definitivas. Foi utilizado no ensaio um sistema hidropônico “Deep Film Technique” (DFT), com sistema de aeração realizada por um compressor de ar acoplado (Figura 6). Foram utilizadas bandejas com capacidade para 4 L e para sustentação da planta, fez-se uso de bases de polipropileno. As bandejas e bases foram revestidas com papel aluminizado para manutenção da temperatura da solução. Cada bandeja comportou duas plantas de alface.

Figura 6 – Sistema de cultivo das alfaces.



Fonte: Ricardo Falesi P. de M. Bittencourt, 2021

Para o cultivo das plantas, utilizou-se a formulação padrão 2 de Hoagland & Arnon (1950) à 50% da concentração iônica. A composição das soluções nutritivas foi alterada quanto ao nível de Mg (Tabela 5). Para preparo da solução foram utilizados sais puros para análise. A renovação da solução nutritiva foi realizada com frequência semanal, ao final da tarde.

Tabela 5 – Soluções estoque utilizadas (mL L^{-1}) para compor as soluções nutritivas contendo níveis variados de magnésio.

Solução estoque	Níveis de magnésio (mmol L^{-1})				
	0,01	0,5	1,0	2,0	4,0
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ M	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
KNO_3 M	3	3	3	3	3
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ M	2	2	2	2	2
MgSO_4 M	-	-	1	1	1
MgCl_2 M	1	0,5	-	1	3
MgCl_2 0,01M	1	-	-	-	-
Na_2SO_4 M	1	1	-	-	-
Fe-EDDHA*	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Micro**	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

** Solução de Fe-EDDHA: $152,3 \text{ g L}^{-1}$ de Fe-EDDHA; *Solução estoque de micronutrientes: $2,86 \text{ g L}^{-1}$ de H_3BO_3 , $1,81 \text{ g L}^{-1}$ de $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $0,22 \text{ g L}^{-1}$ de $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $0,08 \text{ g L}^{-1}$ de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e $0,02 \text{ g L}^{-1}$ de $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Foi monitorado o pH diariamente através de um peagâmetro de bolso (GroLine HI98118 - HANNA®) e, quando necessário, foi realizado a correção do mesmo por meio de soluções de NaOH 1N ou ácido cítrico 1N, mantendo-o na faixa de 5,5 a 6,5. A água perdida por

evapotranspiração foi fornecida regularmente, tendo como base o volume inicial do recipiente, utilizando água destilada. Desde o dia do transplântio até o dia da colheita, as plantas foram monitoradas visando identificar indícios de pendoamento precoce, sendo utilizada a classificação de Holmes et al., (2019), para estimar a intensidade do pendoamento.

Desempenho fisiológico

Aos 49 DAS, foram realizadas medições de trocas gasosas, as quais ocorreram entre 08:00 as 10:00 h. Para tal, realizou-se as medições na terceira folha, no sentido basípeto. Para avaliação dos parâmetros de trocas gasosas, utilizou-se um analisador de gases infravermelho portátil (IRGA, modelo LI6400XT, LICOR®), sob concentração externa de CO₂ de 400 µmol⁻¹ de ar e PAR artificial de 1000 µmol de fótons m⁻² s⁻¹.

Os parâmetros fisiológicos avaliados foram a taxa de fotossíntese líquida (P_n , µmol CO₂ m⁻² s⁻¹), condutância estomática (g_s , µmol H₂O m⁻² s⁻¹), concentração interna de CO₂ (C_i , µmol mol⁻¹), transpiração (E , µmol m⁻² s⁻¹), eficiência de carboxilação (µmol m² s⁻¹)- obtida pela razão entre P_n e C_i , e eficiência instantânea do uso da água (WUE , mmol CO₂ mol⁻¹ H₂O) - obtida pela razão entre P_n e E .

Teores de pigmentos fotossintéticos

Posteriormente a análise de trocas gasosas, realizou-se a coleta de folha do terço médio para a extração e quantificação dos teores de clorofilas e carotenoides. Para tal, utilizou-se a metodologia de Lichtenthaler (1987), sendo realizada a homogeneização no escuro de 1 mg de tecido vegetal fresco em grau contendo 5 mL de solução de acetona à 80%. O extrato obtido foi filtrado e transferido para balão volumétrico com capacidade de 25 mL, sendo o volume deste completado com solução de acetona à 80%. Após isto, realizou-se a leitura da absorbância em espectrofotômetro (Fento, modelo 700 S), nos comprimentos de onda de 470 nm, 646,8 nm e 663,2 nm. Os resultados foram expressos em mg g⁻¹ de matéria fresca.

Crescimento e produção de massa

Aos 50 DAS, procedeu-se com a colheita. As plantas foram compartimentadas em folhas, caule e raiz, sendo coletados dados referentes as variáveis morfológicas, sendo estes a) altura da planta (H, cm) - medida por meio de régua graduada; b) diâmetro do coleto (D, mm) - medido por meio de um paquímetro; c) comprimento da raiz (CRP, cm) - determinada com o auxílio de uma fita métrica; d) massa fresca e seca das folhas (MFF e MSF, g planta⁻¹); e) massa fresca e seca de caule (MFC e MSC, g planta⁻¹); f) massa fresca e seca das raízes (MFR e MSR,

g planta⁻¹); quantificadas a partir da pesagem das massas da parte aérea, raiz. As massas frescas foram determinadas através de pesagem em balança de precisão analítica (0,001 g). As massas secas foram obtidas através de secagem de material fresco à 60°C em estufa de circulação forçada de ar e posterior pesagem.

Qualidade pós-colheita

Além disto, foram coletadas amostras de folhas maduras para caracterização da qualidade pós-colheita das alfaces e para avaliar a atividade de enzimas antioxidantes. Nesta etapa, foram avaliados o teor de sólidos solúveis totais (SST), pH, acidez titulável (AT) e relação SST/AT. Os sólidos solúveis totais foram determinados por meio de um refratômetro digital com correção automática de temperatura. Realizou-se a maceração de 1 g de folha fresca e se transferiu 2 gotas do extrato para o prisma do equipamento (ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY, 2012). Os resultados foram expressos em °Brix (%).

Para a determinação do pH das amostras, 1 g de folha fresca macerada foi adicionado à 30 ml de água destilada. Após isto, realizou-se a leitura da amostra utilizando um peagâmetro de bancada - modelo PHOX P1000 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). A acidez titulável – AT, foi determinada de acordo com a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008), através da titulação do extrato (1 g de folha fresca com água destilada e indicador de fenolftaleína à 1%) com solução de NaOH 0,1 N, com resultados expressos em % de ácido cítrico. A relação SST/AT das amostras foi calculada pela relação entre estas duas variáveis.

Extravasamento de eletrólitos

Foram avaliados ainda, o extravasamento de eletrólitos das folhas de alface. Este foi quantificado, conforme a metodologia de Lafuente et al. (1991). Realizou-se coleta de 5 discos foliares e posterior lavagem destes em água deionizada. Após isto, os discos foram aclimatados por 20 horas em recipientes de vidro contendo 20 ml de água deionizada em temperatura ambiente. Após o período de aclimação, realizou-se a leitura da condutividade elétrica da amostra e posteriormente, as amostras foram submetidas à temperatura de 105 °C em banho maria por um período de 15 minutos. Uma vez retiradas do banho maria, as amostras foram esfriadas em temperatura ambiente, sendo, posteriormente, realizada nova leitura de condutividade. Com posse da condutividade inicial e final, aplicou-se a equação 1:

$$EL (\%) = \left(\frac{CEi}{CEf} \right) * 100$$

Onde: CE_i e CE_f são as condutividades após o repouso e após a morte dos tecidos, respectivamente.

Atividade da Catalase e Peroxidase do Guaiacol

O extrato para a determinação da atividade das enzimas Peroxidase do Guaiacol (GPX) e Catalase (CAT) foi obtido a partir da homogeneização de 0,1 g do pó liofilizado de folha em almofariz, a temperatura de 4 °C, contendo 5 mL de solução-tampão fosfato de potássio (0,1 mM) a pH 7,0, contendo EDTA (0,1 mM), durante 4 min, conforme descrito por Conceição et al. (2019). O homogeneizado foi filtrado em tecido de nylon e transferido para tubos de ensaio, sendo mantidos a 4°C por duas horas, realizando-se agitações ocasionais. Após isto, o homogeneizado filtrado foi submetido a centrifugação à 12.000 x g, por 15 minutos em temperatura de 4° C. O sobrenadante (extrato bruto) foi transferido para tubos de ensaio e foi armazenado em freezer -80°C até o momento de quantificação da atividade das enzimas.

Com posse do extrato a atividade da GPX (EC 1.11.1.9) foi determinada. Utilizando mistura de reação composta por 50 µL pelo extrato diluído, 950 µL de tampão fosfato de potássio (0,1 M) a pH 7,0, contendo EDTA (0,1 mM), 500 µL de guaiacol (0,02 M) e 500 µL de H₂O₂ (0,06 M) com base na metodologia de Kar & Mishra (1976). Os resultados foram expressos em µmol de H₂O₂ min⁻¹. g⁻¹ de MS.

Para a CAT (EC 1.11.1.6) a reação foi composta por tampão fosfato de potássio (0,1 M) e EDTA (0,1 µM) a pH 7,0, H₂O₂ (0,5 M) e 150µL do extrato bruto diluído em um volume final de 1,5 mL. A atividade enzimática foi determinada pelo decréscimo da absorbância a 240 nm, resultado da decomposição do H₂O₂, durante 1 min, conforme descrito por Beers & Sizer (1952). Os resultados foram calculados e expressos em µmol de H₂O₂ min⁻¹. g⁻¹ de MS.

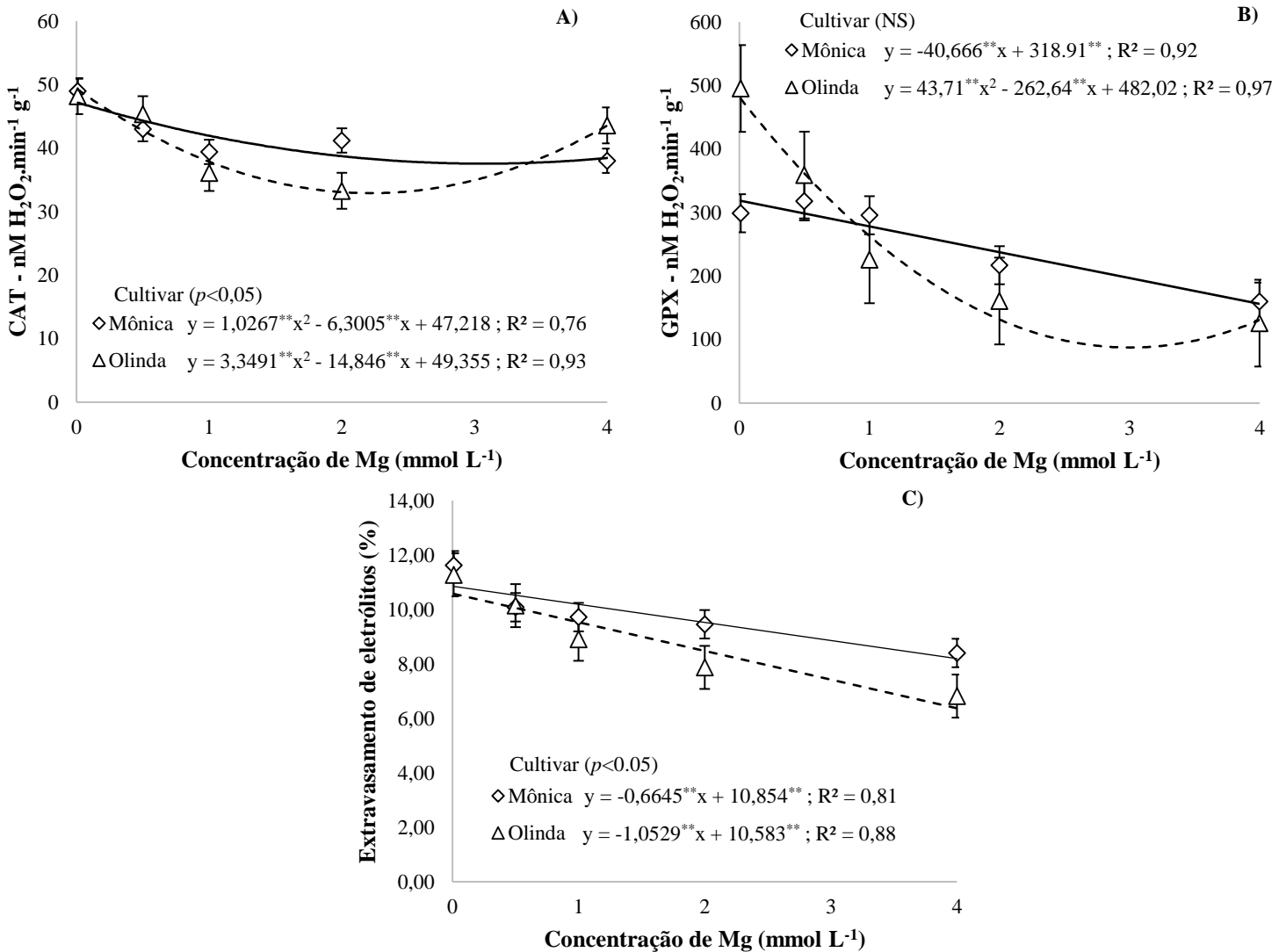
Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos as análises de normalidade e homocedasticidade pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Atendendo a estes pressupostos, procedeu-se com a análise de variância pelo teste t ($p < 0,05$) e quando significativo, foram ajustados modelos de regressão para as concentrações de Mg na solução nutritiva. Para tais análises, utilizou-se o software R-Studio (R Core Team, 2020).

RESULTADOS

O suprimento de Mg na solução nutritiva afetou positivamente o sistema de enzimas antioxidativas CAT e GPX e reduziu danos celulares nas folhas das cultivares de alface ($p < 0,05$). Para a CAT (Figura 7A), foram observados comportamentos quadráticos decrescentes em função das concentrações de Mg na solução nutritiva. Observamos ainda, que a atividade da enzima foi afetada em função das cultivares avaliadas, com a cultivar Mônica apresentando maior atividade. Para a cultivar Olinda, a dose de $2,22 \text{ mmol L}^{-1}$ resultou na menor atividade desta enzima, enquanto que para Mônica, foi de $3,07 \text{ mmol L}^{-1}$

Figura 7 – Atividade das enzimas catalase CAT (A) e peroxidase do guaiacol GPX (B) e extravasamento de eletrólitos das folhas (C) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “**” indicam significância do teste t a 5% e 1%, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão.



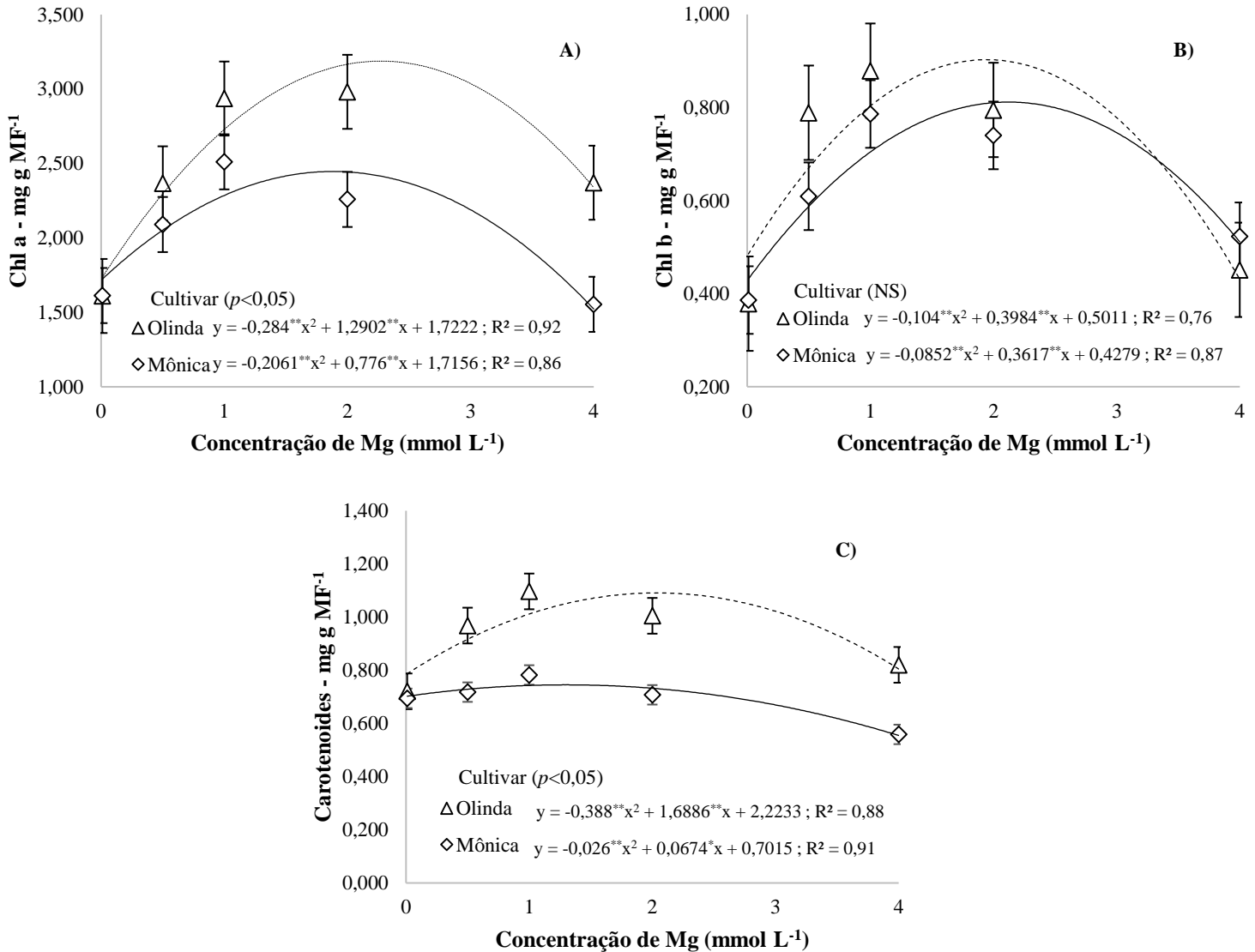
Para a enzima GPX (Figura 7B), houveram diferenças em relação ao comportamento da atividade em função do teor de Mg, de forma que para a cultivar Mônica foi ajustado um modelo

linear decrescente, enquanto para a cultivar Olinda, a atividade apresentou comportamento quadrático decrescente, com máxima atividade na concentração de 3,00 mmol L⁻¹. Contrariamente ao que se observou para a CAT, a GPX não foi observado efeito da cultivar em relação a atividade da enzima.

Para ambas as enzimas, foi observado uma elevada atividade em menores doses com tendência de decréscimo da atividade em função da concentração de Mg na solução nutritiva. Corroborando com a atividade destas enzimas, foi observada redução ($p < 0.05$) da taxa de extravasamento de eletrólitos (Figura 7C) das folhas das duas cultivares em função da concentração de Mg, com comportamento linear negativo para ambas as cultivares, com menor extravasamento assinalado na dose de 4 mmol L⁻¹.

Como esperado, em relação ao conteúdo dos pigmentos fotossintéticos (Figura 8), foram observados efeitos da concentração de Mg ($p < 0.05$). Em todos os pigmentos avaliados foram assinalados comportamentos quadráticos positivos em ambas as cultivares. Para o teor de clorofila a (Figura 8A) e carotenoides (Figura 8C), o conteúdo desses pigmentos foi também, foram influenciados pelo material genético das cultivares, sendo as concentrações críticas de Mg foram 2,27 e 1,81 mmol L⁻¹ para clorofila a, e 2,04 e 1,30 mmol L⁻¹ para carotenoides, respectivamente para as cultivares Olinda e Mônica.

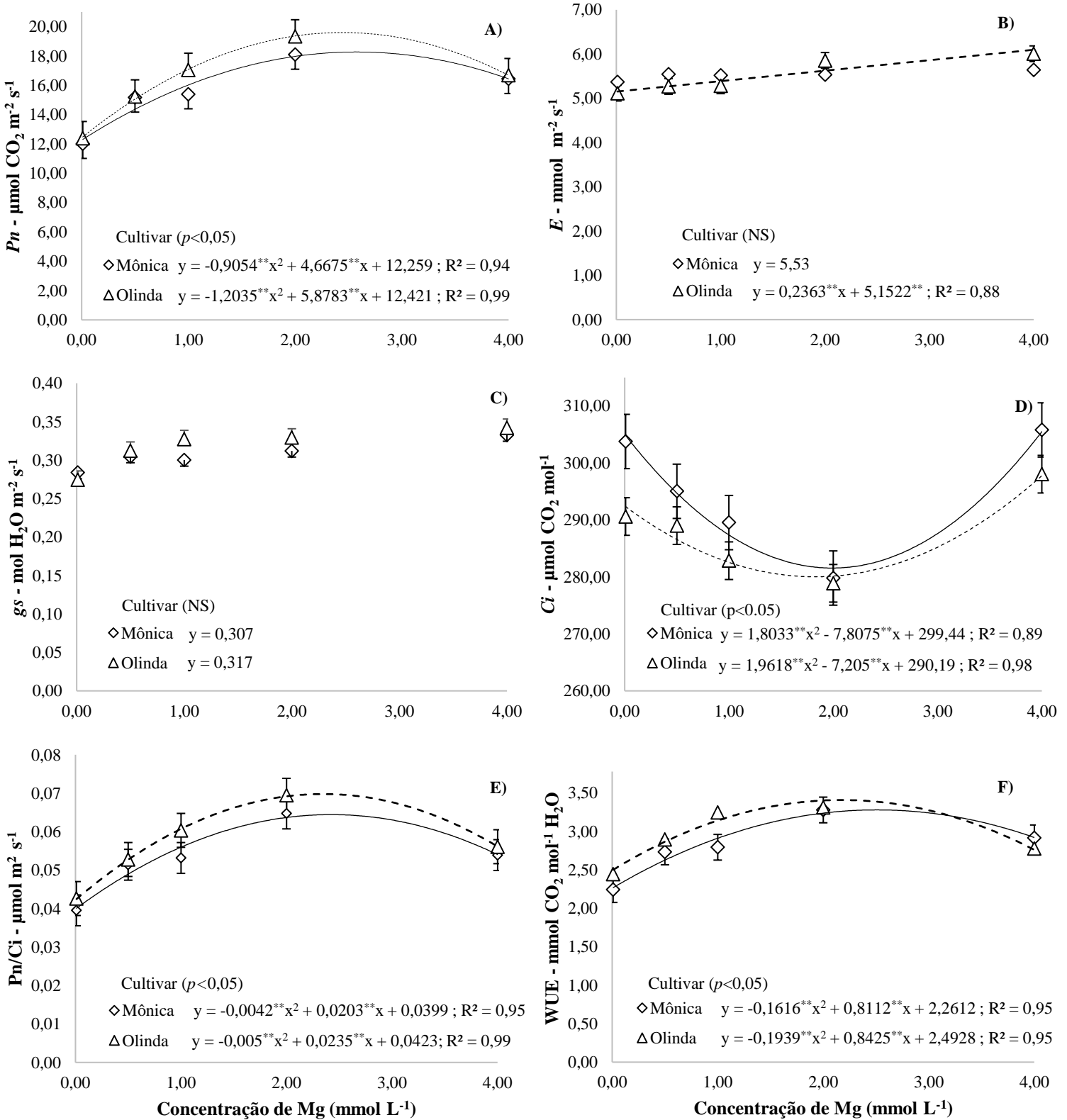
Figura 8 – Teor de clorofila a (A), clorofila b (B) e carotenoides (C) em cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1%, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão.



O mesmo comportamento foi observado para o teor de clorofila b (Figura 8B), contudo, não foram observadas diferenças em função das cultivares, somente para as concentrações de Mg na solução nutritiva. Para este pigmento, as concentrações críticas de Mg na solução foram 1,92 e 2,05 mmol L⁻¹ para as cultivares Olinda e Mônica, respectivamente.

Em função destes comportamentos, também observamos efeito da concentração de Mg na solução nutritiva no desempenho fisiológico (Figura 9) das cultivares de alface ($p < 0,05$) com exceção para os parâmetros g_s (ambas as cultivares) e E , este último apenas para a cultivar Mônica.

Figura 9 – Fotossíntese líquida – P_n (A), transpiração – E (B), condutância estomática – g_s (C), carbono intercelular - C_i (D), eficiência de carboxilação – P_n/C_i (E) e eficiência de uso de água – WUE (F) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “**” indicam significância do teste t a 5% e 1%, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão.



Para P_n (Figura 9A), ambas as cultivares apresentaram comportamento quadrático crescente, com a Olinda apresentando desempenho superior a Mônica. As doses críticas para do desempenho nesse parâmetro foram de 2,44 e 2,58 mmol L⁻¹, as quais resultam em uma P_n estimada de 19,61 e 18,27 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente para Olinda e Mônica.

Em relação a E (Figura 9B) a cultivar Olinda teve seu comportamento ajustado a um modelo linear positivo, com maior taxa de transpiração assinalada na dose de 4 mmol L⁻¹. Para a cultivar Mônica, este parâmetro não foi afetado pelo fornecimento de Mg na solução. Foi observado que a concentração de Mg na solução nutritiva não afetou g_s das plantas de alface e que as cultivares não diferiram entre si (Figura 9C).

Para o C_i (Figura 9D), verificou-se comportamento quadrático decrescente em função da concentração de Mg para as duas cultivares, com maior acúmulo assinalado de CO₂ nas doses 0,01 e 4,0 mmol L⁻¹. A concentração ótima de Mg para C_i foi de 1,84 e 2,17 mmol L⁻¹, o que resultou em 283,57 e 290,99 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ para Olinda e Mônica, respectivamente.

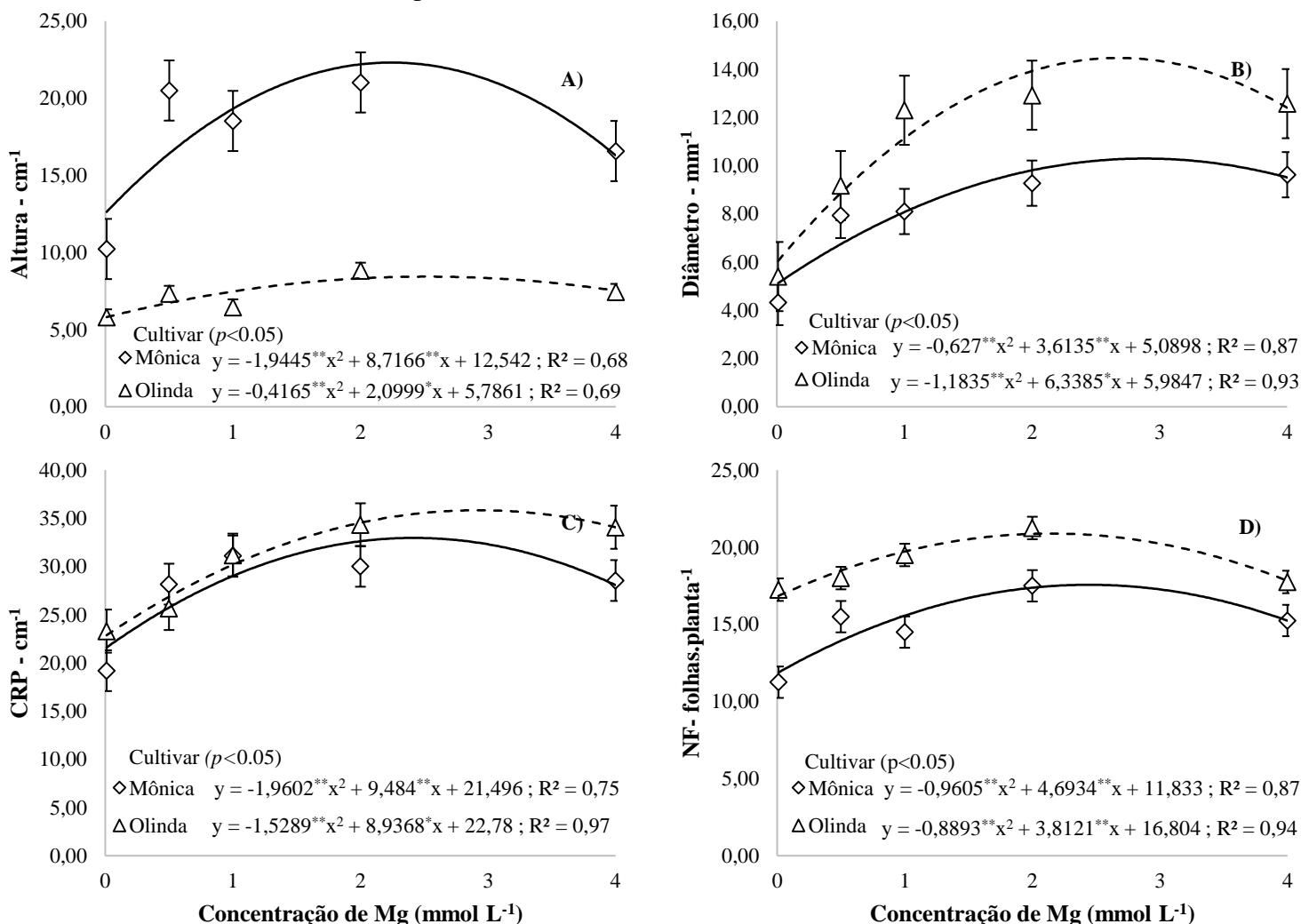
Em função disto, o comportamento da P_n/C_i (Figura 9E) em função da concentração de Mg, foi caracterizada por um modelo quadrático positivo, similar ao observado para P_n , indicando que até certa concentração o Mg melhora a capacidade fotossintética, bem como a eficiência desse processo. O máximo desempenho para P_n/C_i , foi de 0,07 (2,35 mmol L⁻¹) e 0,06 (2,42 mmol L⁻¹), respectivamente para as cultivares Olinda e Mônica.

A concentração de Mg, ainda favoreceu a WUE (Figura 9F) de ambas as cultivares avaliadas, apresentando comportamento quadrático positivo, com maior eficiência observada nas concentrações 2,17 e 2,51 mmol L⁻¹, para Olinda e Mônica, respectivamente. Além disso, observamos melhor desempenho para a cultivar Olinda. Neste sentido, observamos que o estado nutricional do Mg afeta o desempenho bioquímico e fisiológico das cultivares de alface e, conseqüentemente, interfere no crescimento e desenvolvimento das mesmas.

A concentração de Mg na solução nutritiva afetou todos os parâmetros de crescimento avaliados ($p < 0,05$), em geral, apresentando modelos quadráticos positivos para ambas as cultivares. Para a variável altura da planta (Figura 10A), observamos acentuado crescimento de cerca de 105,6% quando em comparação as concentrações de 0,01 mmol L⁻¹ e 2 mmol L⁻¹ para a cultivar Mônica. Já para a cultivar Olinda, o incremento foi inferior, ocorrendo em ordem de 65,7%. Ressalta-se que independentemente da concentração de Mg, a cultivar Mônica apresentou indícios de pendoamento com 29 dias após a semeadura.

Em relação ao diâmetro (Figura 10B), foi observado que a concentração de Mg na solução promove o incremento deste nas duas cultivares até as concentrações críticas de 2,67 mmol L⁻¹ para Olinda e 2,88 mmol L⁻¹ para Mônica. Além da parte aérea, foram observadas influência da concentração de Mg nas raízes (Figura 10C) das duas cultivares de alfaces, com o menor CRP encontrado na dose 0,01 mmol L⁻¹ com incrementos à medida em que a concentração se elevava, até as doses 2,92 e 2,42 mmol L⁻¹ para Olinda e Mônica, respectivamente.

Figura 10 – Altura - H (A), Diâmetro do caule - D (B), comprimento da raiz principal - CRP (C) e número de folhas - NF (D) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1% respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão.

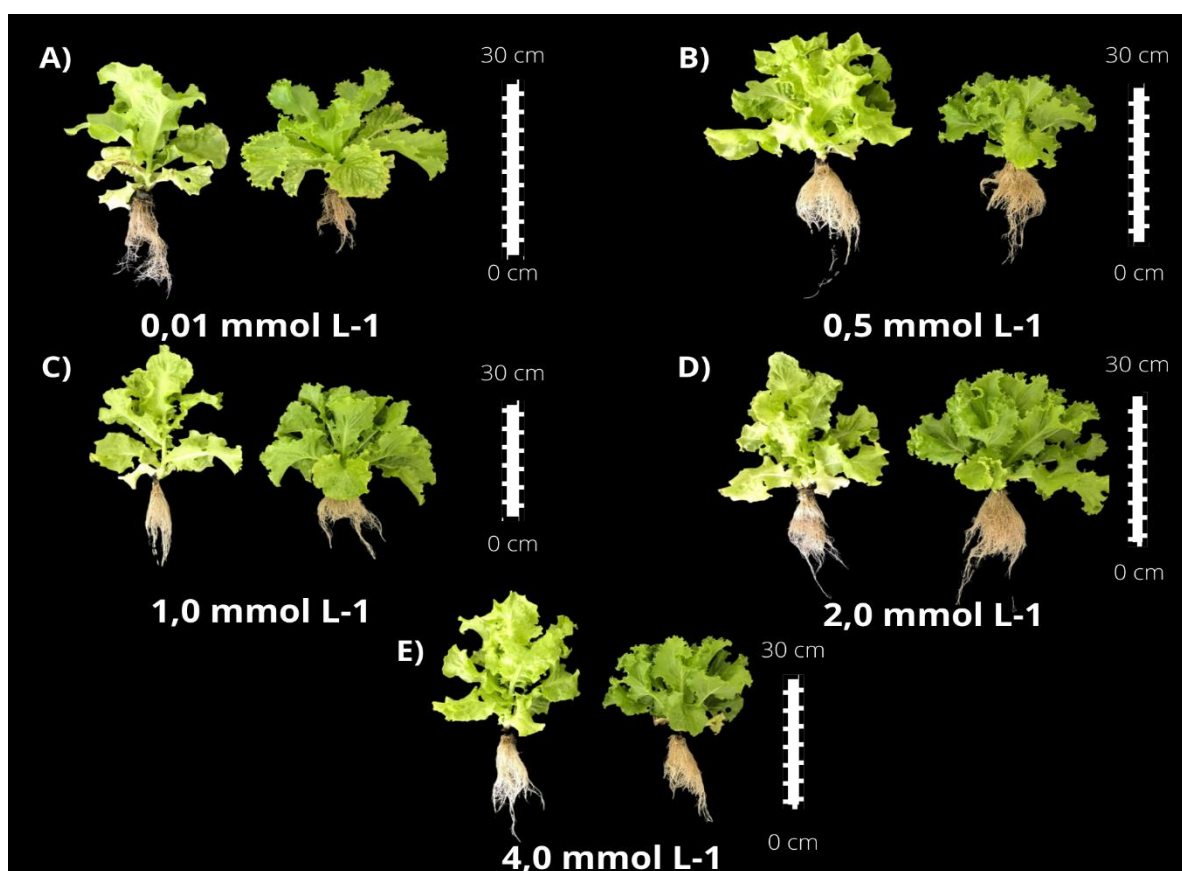


Comportamento similar foi observado para o número de folhas (NF) para as duas cultivares, com menor produção novamente sob menor concentração de Mg na solução. Com incremento da concentração houve aumento do NF até as doses 2,14 e 2,44 mmol L⁻¹ que

resultaram em uma produção máxima de 21 e 17 folhas planta⁻¹ para Olinda e Mônica, respectivamente.

Além disto, deve-se ressaltar ainda, o aspecto sensorial da alface, o qual foi notoriamente afetado em função da nutrição fornecida, com expressão de sintomatologia característica de deficiência de Mg nas duas cultivares nas doses de 0,01 e 0,5 mmol L⁻¹ (Figura 11A e 11B). A partir das doses de 1 mmol L⁻¹, não são observadas sintomatologias visíveis, contudo, há a variação em resposta de crescimento e produção (Figura 11C, 11D e 11E).

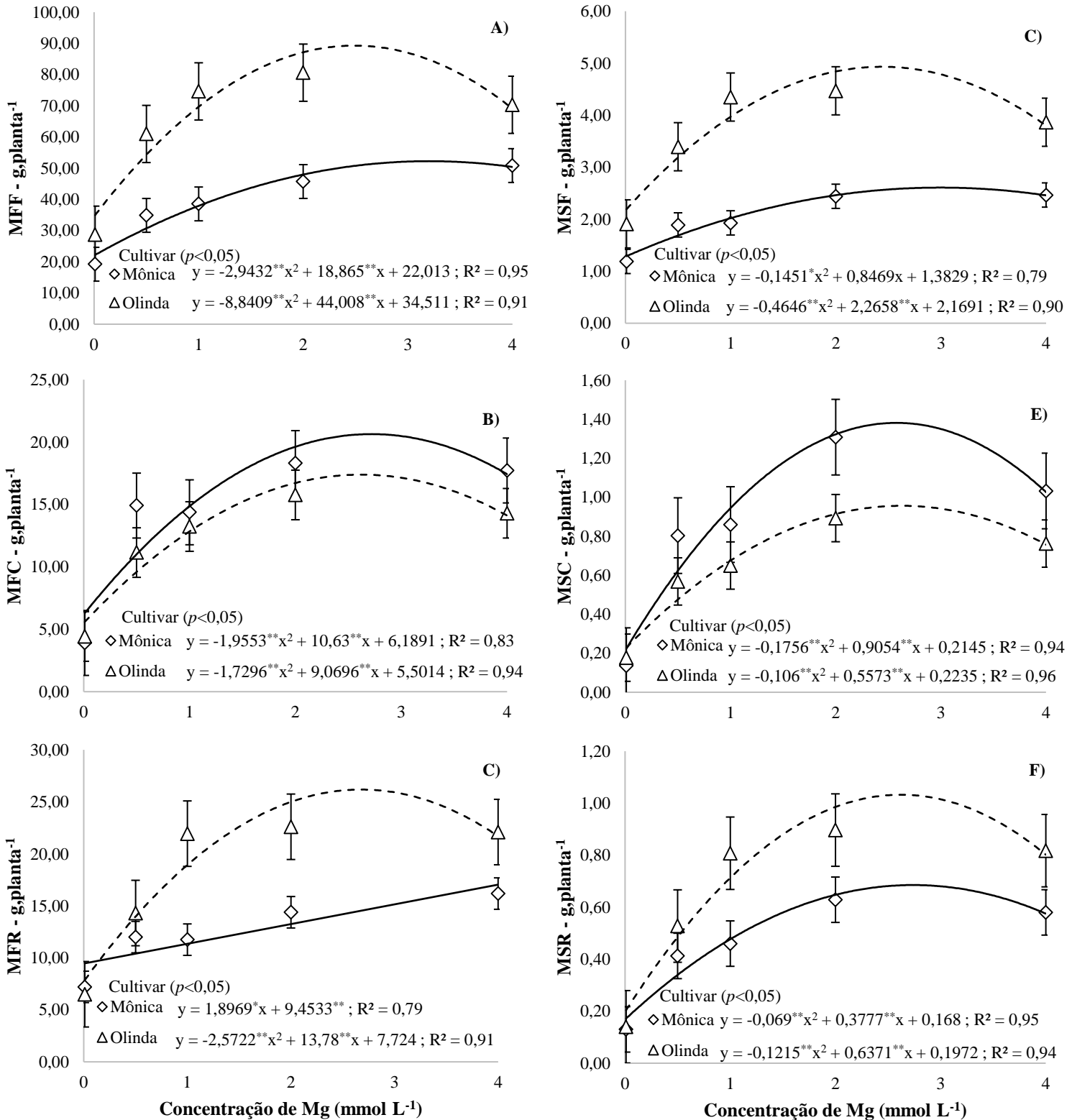
Figura 11 – Aspecto visual das cultivares de alface Olinda (à direita) e Mônica (à esquerda) nas concentrações de 0,01 (A), 0,5 (B), 1,0 (C), 2,0 (D) e 4,0 mmol L⁻¹ (E) na solução nutritiva.



Fonte: Ricardo Falesi P. de M. Bittencourt, 2021

O acúmulo de biomassa fresca e seca também foi afetado pela concentração de Mg ($p < 0,05$), sendo o comportamento das variáveis ajustado a modelos quadráticos para ambas as cultivares de alface avaliadas, com exceção a MFR para cultivar Mônica, a qual se ajustou a um modelo linear crescente. Em relação a MFF e MSF, as concentrações críticas estabelecidas foram respectivamente 2,48 e 2,44 para Olinda e 3,20 e 2,92 mmol L⁻¹, para a Mônica. Estas concentrações estimam um acúmulo máximo, respectivamente de massa fresca e seca, 89,28 e 4,93 g planta⁻¹ para Olinda e 52,24 e 2,62 g planta⁻¹ para a Mônica.

Figura 12 – Massas frescas de folhas - MFF (A), caule - MFC (B), raiz - MFR (C) e massas secas de folhas -MSF (D), caule - MSC (E) e raiz – MSR (F) de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão.



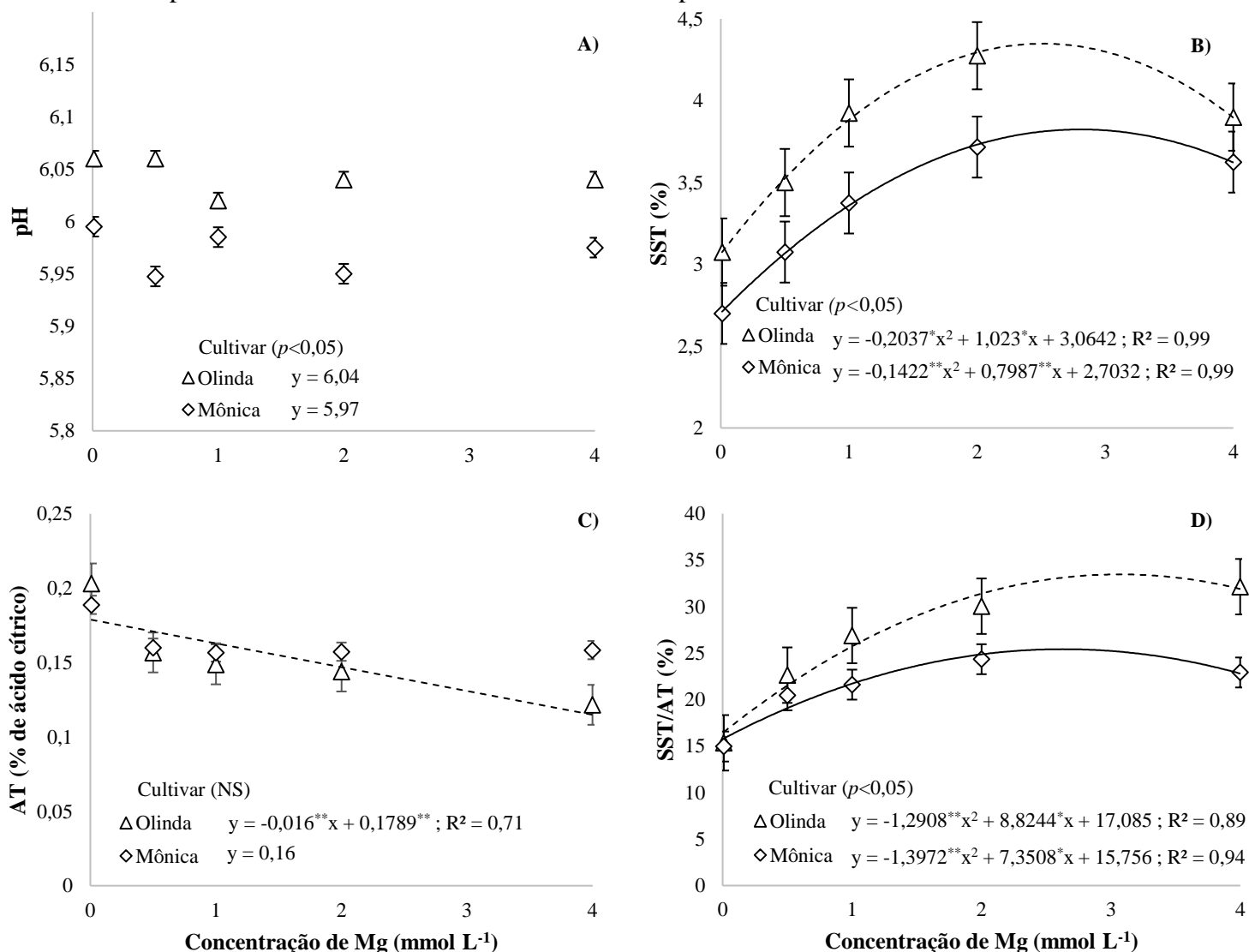
Para as variáveis MFC e MSC (Figura 12B e 12E), as concentrações críticas estabelecidas foram 2,59 e 2,63 mmol L⁻¹, para a cultivar Olinda e 2,72 e 2,58 mmol L⁻¹ para

Mônica. Contudo, diferentemente do que ocorreu para o acúmulo de folhas, a cultivar Mônica apresentou maior massa acumulada neste compartimento da planta.

Conforme observado para CRP, a MFR e MSR (Figura 12C e 12F) também receberam incrementos em função da concentração de Mg na solução nutritiva, contudo, para a cultivar Mônica, a MFR apresentou comportamento linear, com máximo acúmulo na dose de 4 mmol L⁻¹, resultando em um incremento de massa em ordem de 8,97 g planta⁻¹ (124,5%). Para MFR da cultivar Olinda, a concentração crítica foi encontrada na concentração 2,68 (resultando em acúmulo de 26,18 g planta⁻¹) já para MSR as concentrações 2,62 e 2,74 mmol L⁻¹ expressam o máximo desempenho nesta variável para as cultivar Olinda e Mônica, respectivamente. Novamente, a cultivar Olinda apresentou acúmulo superior em relação a cultivar Mônica.

As variáveis de pós-colheita (Figura 13) também foram melhoradas em função do fornecimento de Mg ($p < 0,05$), contudo, as variáveis pH, e AT (apenas para a cultivar Mônica) não foram afetadas. A concentração de Mg na solução nutritiva promoveu incrementos positivos para SST e SST/AT para as duas cultivares de alface indicando melhoria da qualidade das folhas. Para um máximo valor em SST e SST/AT, as concentrações críticas de Mg foram de 2,51 e 3,42 mmol L⁻¹ para Olinda e 2,81 e 2,63 mmol L⁻¹ para Mônica. Ainda, observamos redução linear na AT da cultivar Olinda, o que resultou em uma redução de 59,8% quando em comparação com as plantas que receberam 0,01 mmol L⁻¹ de Mg.

Figura 13 – Potencial hidrogeniônico - pH (A), sólidos solúveis totais - SST (B), Acidez titulável - AT (C) e relação SST/AT (D) de folhas de cultivares de alface em função da concentração de Mg na solução nutritiva. “*” e “***” indicam significância do teste t a 5% e 1% de probabilidade. Barras verticais indicam o erro padrão.



DISCUSSÃO

O Mg melhora o sistema antioxidativo das alfaces

Com base nos resultados de atividade de enzimas antioxidantes, verificamos que o Mg favorece o funcionamento fisiológico da alface, uma vez que, a medida em que o estado nutricional da planta é contemplado, as enzimas CAT (nas doses 2,22 e 3,07 mmol L⁻¹ respectivamente para Olinda e Mônica) e GPX (3,0 mmol de L⁻¹ para Olinda e 4,0 mmol L⁻¹ para Mônica) apresentam decréscimo em sua atividade (Figura 7). Por outro lado, quando a planta apresenta um excesso desse elemento, a atividade das enzimas aumenta novamente,

indicando sinais de desbalanços metabólicos provocados pela toxidez deste elemento (MARSCHNER, 2012).

Além disso, o Mg favoreceu a integridade estrutural da membrana das folhas das duas cultivares, uma vez que reduziu linearmente a taxa de extravasamento de eletrólitos das folhas, o que, para condições de temperatura elevada é um indicador positivo, uma vez que confere as plantas uma maior capacidade de retenção de água e solutos mesmo em condição de elevação da temperatura (CAMEJO et al., 2005).

A atividade das enzimas antioxidantes observadas para as alfaces corroboram com os ensaios realizados com plantas de amora (*Morus alba* L.), por Tewari et al. (2006), e mudas de cafeeiro por Silva et al. (2017), onde foi observado que o estresse ocasionado pela deficiência de Mg eleva a atividade de enzimas antioxidantes, em função de uma maior geração de ERO. A elevação da atividade dessas enzimas indica a ativação do maquinário antioxidante no esforço de reduzir os efeitos deletérios das ERO nas estruturas dos cloroplastos (TRÄNKNER et al., 2016). Logo, à medida em que o sistema vegetal entra em homeostase, a atividade destas enzimas tende a estabilizar.

Este comportamento de atividade de enzimas antioxidantes pode estar também relacionado a inibição da biossíntese das clorofilas (HÖRTENSTEINER; KRÄUTLER, 2011), as quais apresentaram em geral, um comportamento inverso ao da atividade das enzimas (Figura 8). Tränkner et al. (2016) ressalta que, dentre outras razões, as cloroses e necroses podem surgir em função da superprodução de ERO, podendo influenciar no conteúdo relativo de clorofilas das folhas.

A deficiência de Mg resultou no decréscimo do teor de pigmentos fotossintéticos em plantas de amoeira, *Vicia faba* e mudas de *Citrus sinensis* (TEWARI; KUMAR; SHARMA, 2006; SIDDIQUI et al., 2018; YE et al., 2019). Conseqüentemente, plantas sob concentrações de Mg de 0,01 e 0,5 mmol L⁻¹ expressaram coloração verde menos intensa, com sintomatologia de deficiência visual nas folhas mais velhas (Figura 10) em função do Mg ser primordial à síntese das clorofilas, atuando como íon central do anel tetrapirrólico destas moléculas (MARSCHNER, 2012; TAIZ et al., 2017; DE BANG et al., 2021).

Além disto, o Mg atua na translocação de fotoassimilados, sendo esta, a fase precursora da sintomatologia visual, através do acúmulo de carboidratos, os quais são responsáveis por uma alteração da enzima magnésio-quelatase, o que resulta na acumulação de protoporfirina

IX, induzindo uma redução de transporte de elétrons e consequentemente a produção de ERO (PAUL; FOYER, 2001; HERMANS et al., 2005; CAKMAK; YAZICI, 2010).

Ressaltamos ainda a diferença entre a adaptabilidade entre as duas cultivares, com a cultivar Olinda, apresentando maior atividade de enzimas antioxidantes e menor taxa de extravasamento de eletrólitos em relação a Cv Mônica, a qual apresenta limitações produtivas em função do clima, sobretudo por conta do pendoamento precoce. Vale ressaltar ainda, que, de acordo com Liu et al. (2020), os genes responsáveis pelo pendoamento precoce, tem como gatilho as ERO geradas pelo estresse térmico.

Contudo, nossos resultados indicam que isoladamente, o manejo da nutrição com Mg não foi suficiente para mitigar a problemática do pendoamento precoce na cultura da alface, uma vez que 100% da população da cultivar Mônica expressou indícios de pendoamento variando entre grau 1 e 2 com base em escala adaptada de (HOLMES et al., 2019), independente da concentração de Mg na solução nutritiva. Já a cultivar Olinda, apesar da expressão da deficiência nutricional, não apresentou indícios de pendoamento.

O Mg eleva a eficiência fotossintética das alfaces

Houve um incremento na capacidade de trocas gasosas das duas cultivares de alface avaliadas, estando isso evidente principalmente pelo comportamento das variáveis Pn , Pn/Ci e WUE , as quais sofreram alterações positivas com a elevação da concentração de Mg até suas respectivas concentrações críticas, para as duas cultivares.

A otimização no fornecimento de Mg ocasionou um incremento de 58,3% e 52,1% na Pn em relação a concentração de 0,01 mmol L⁻¹ para as cultivares Olinda e Mônica, respectivamente. A redução na Pn em função da deficiência de Mg pode ser atribuída a diversos fatores, tais como questões não estomáticas (TANG et al., 2012), decréscimo no conteúdo de clorofilas (PEASLEE & MOSS, 1966) e acúmulo de carboidratos nas folhas, ocasionando a inibição da atividade de enzimas como a RUBISCO, bem como induzir o fechamento estomático e limitar a entrada de CO₂ (DESIKAN et al., 2004; KUMAR TEWARI; KUMAR; NAND SHARMA, 2006; FARHAT et al., 2016). Fatores estes que afetaram o desempenho das cultivares sob concentração baixas de Mg, estando isso evidente pela baixa Pn e elevado Ci , sobretudo na dose de 0,01 mmol L⁻¹. Contudo, observamos que em ambas as cultivares, a g_s não foi afetada pela concentração de Mg.

Isto indica que, as limitações de P_n anteriores as concentrações de 2,44 e 2,58 mmol L⁻¹, para Olinda e Mônica respectivamente, não ocorreram em função de razões de ordem estomática (uma vez que a g_s não foi afetada), mas sim por conta de limitações bioquímicas (SAMPAIO et al., 2021b). A redução da P_n quando ocasionada por razões não estomáticas, ocorre quando o aparato fotossintético dos cloroplastos não se encontra comprometido, uma vez que, independente do fechamento estomático, o CO₂ continuará a ser fixado, resultando em uma redução do C_i (TAIZ et al., 2017; LEMOS NETO et al., 2020).

À medida em que a concentração de Mg sofre incrementos após as concentrações críticas para as cultivares, observa-se decréscimo da P_n , a qual pode ser atribuída à redução no conteúdo de clorofilas, as quais apresentaram comportamento similar a este parâmetro. O fornecimento excessivo de um elemento ou toxidez, ocasiona redução de desempenho das plantas em função de desbalanços nutricionais gerados no metabolismo vegetal (MALAVOLTA, 2006).

Logo, observamos que o balanceamento da concentração de Mg na solução nutritiva ocasionou aumento da eficiência do funcionamento fisiológico para as duas cultivares de alface, estando isto evidente devido ao incremento em ordem de 64,3% e 51,7% para P_n/C_i e 39,7% e 46,3% para WUE para Olinda e Mônica, respectivamente. Nossos resultados contrastam com os obtidos por Tränkner et al. (2016), onde se observou elevação do WUE das folhas de plantas de cevada sob deficiência de Mg em comparação com plantas apresentando nutrição de Mg adequada.

A concentração de Mg favorece o crescimento e acúmulo de massa das cultivares de alface

Similarmente aos comportamentos bioquímicos e fisiológicos, o crescimento e produção das cultivares de alface também foram afetados pela concentração de Mg, na solução nutritiva. Este desempenho pode ser atribuído considerando os aspectos gerais promovidos pela nutrição com Mg, a qual favoreceu o sistema antioxidante enzimático, o teor de pigmentos fotossintéticos, bem como a eficiência fotossintética das cultivares de alface, resultando em um melhor acúmulo de biomassa e crescimento vegetativo.

O Mg participa de diversas reações e processos metabólicos de na planta, onde destacam-se os processos de fotofosforilação, fixação de CO₂ (afetando diretamente a fotossíntese), síntese de clorofilas, assimilação e translocação de fotoassimilados (CAKMAK;

YAZICI, 2010; MARSCHNER, 2012; TRÄNKNER; TAVAKOL; JÁKLI, 2018). Para Cakmak & Yazici (2010), a forma de produção das plantas é diretamente dependente de fatores condicionados pela presença Mg, como a capacidade de fixação de CO₂ em carbono orgânico; translocação do carbono fixado dos órgãos fonte (folhas maduras) para órgãos dreno (raízes e folhas jovens, flores e frutos) bem como da utilização deste carbono orgânico para o crescimento da planta. Em função disto, a concentração de crítica de Mg promoveu elevação em 21,6% e 56,4% na NF das cultivar Olinda e Mônica, tornando-as mais produtivas.

Além da produção de folhas, observamos que o acúmulo de massa seca e fresca de folhas, caule e raízes foram favorecidos pela nutrição com Mg. Corroborando com nossos resultados, Siddiqui et al. (2018) observaram incrementos na altura, área foliar e acúmulo de massa seca e fresca em plantas de *Vicia faba* sob nutrição adequada de Mg quando em comparação com plantas deficientes. Avaliando a omissão de nutrientes em alface crespa cultivar Verônica, Batista et al. (2011) observaram que sob omissão de Mg ocorreu decréscimo de altura, área foliar, número de folhas, massa seca de folhas, caule e raízes, além de menor índice de clorofila total. Indicando a importância produtivo do estado nutricional desse elemento para a produção e crescimento da cultura.

Outro aspecto relacionado a produção é a característica sensorial das alfaces (HOLMES et al., 2019), as quais apresentaram clorose internerval e restrição de crescimento em função da deficiência de Mg, o que influencia negativamente na comercialização da produção, uma vez que no Brasil, predomina-se a comercialização de alface *in natura*, com a coloração e sanidade visual sendo os principais atributos observados pelos consumidores (SALA; DA COSTA, 2012).

Além disto, a nutrição desbalanceada com Mg ocasionou em redução do crescimento radicular de ambas as cultivares, tal qual reportado por Cakmak; Hengeler & Marschner (1994) e Cakmak & Yazici (2010), para plantas de feijão sob deficiência de Mg. Os autores ainda indicam que, a restrição do crescimento radicular é a primeira sintomatologia expressada pela planta, antes mesmo da expressão de clorose internerval visual nas folhas. Este efeito nas raízes se dá em função das baixas concentrações de açúcares nestes órgãos (FARHAT et al., 2016; TRÄNKNER; TAVAKOL; JÁKLI, 2018), decorrente da baixa disponibilidade de Mg-ATP, o qual é substrato para o funcionamento de ATP'ases que abastecem o floema com açúcares, abastecendo os órgãos dreno (CAKMAK; KIRKBY, 2008; TRÄNKNER; TAVAKOL; JÁKLI, 2018).

Magnésio como promotor de qualidade pós-colheita

A concentração de Mg na solução nutritiva favoreceu a qualidade pós colheita das alfaces, contudo, não teve efeitos no pH das folhas. Acerca do pH, as cultivares diferiram entre si, de forma que os maiores valores de pH foram observado para a cultivar Olinda, indicando maior digestibilidade das folhas. O pH das folhas é afetado por diversos fatores extrínsecos e intrínsecos a espécie (CORNELISSEN et al., 2006). Logo, este resultado pode ser atribuído a diferenças genéticas existentes entre as cultivares avaliadas.

A concentração de 2,51 e 2,81 mmol L⁻¹ de Mg promoveu um incremento de 41,46% e 41,48% no teor de SST das cultivares Olinda e Mônica, respectivamente. Esta característica é muito desejável pois, o SST atua como um indicador de durabilidade, quanto mais elevado, maior o tempo de prateleira da alface, uma vez que os açúcares solúveis servem de substrato para respiração (DAMODARAN; PARKIN; FENNEMA, 2010; REIS et al., 2014).

Sob deficiência de Mg, as folhas tendem a apresentar maiores teores de açúcares e carboidratos, em função da atuação deste elemento na translocação de fotoassimilados e abastecimento do floema, contudo, este acúmulo se inicia à priori nas raízes e posteriormente é observado nas folhas mais maduras (CAKMAK; HENGELER; MARSCHNER, 1994; CAKMAK; YAZICI, 2010). Este fenômeno pode não ter sido detectado em nosso trabalho em função das folhas avaliadas serem recém maduras (localizadas no terço médio da planta), e justificaria a decréscimo de SST nos tratamentos deficientes em Mg.

Além disso, observamos redução linear da AT para a cultivar Olinda em função da elevação da concentração de Mg, o que indica uma contribuição para a palatabilidade das folhas de alface, uma vez que os ácidos orgânicos presentes nas folhas conferem um sabor de amargor, contudo, ajudam a reduzir a taxa de degradação microbiológica das folhosas (CHITARRA & CHITARRA, 2005).

A concentração de Mg favoreceu relação SST/AT, a qual apresentou incrementos positivos em ambas as cultivares, indicando que, a nutrição com este elemento proporcionou melhorias na palatabilidade e possivelmente na durabilidade destas folhosas após a colheita (CHITARRA & CHITARRA, 2005; REIS et al., 2014). Contudo, novamente a cultivar Olinda apresentou relação SST/AT superior a Mônica. Esta diferença na palatabilidade para a cultivar

Mônica está condicionada em função da expressão do pendoamento precoce, o qual induz a produção de látex em plantas de alface (ALBERONI, 1998).

CONCLUSÃO

O Mg melhora o sistema antioxidativo das cultivares de alface, aumentando o teor de clorofilas e carotenoides, além de reduzir a ação das enzimas CAT e GPX e extravasamento de eletrólitos à medida que a demanda nutricional é atendida. Contudo, não inibiu a expressão do pendoamento precoce na cultivar Mônica, mas atenuou as perdas de produtivas e de qualidade pós-colheita.

O Mg promove incrementos na capacidade fotossintética, crescimento e produção das cultivares de alface, com concentrações críticas estimadas de 2,44 mmol L⁻¹ e 2,92 mmol L⁻¹, respectivamente para as cultivares Olinda e Mônica.

CONCLUSÕES GERAIS

As cultivares Olinda e Cristina obtiveram desempenho produtivo e qualidade pós colheita de destaque, sendo consideradas cultivares de elevada aptidão em condição de clima quente, enquanto as cultivares Mônica, Veneranda, Grand Rapids e Cinderela foram classificadas como de baixa aptidão, sendo a expressão do pendoamento precoce o principal motivador do baixo desempenho produtivo.

A concentração de Mg na solução nutritiva favorece a produtividade, desempenho fisiológico, capacidade de resposta antioxidativa e acúmulo de pigmentos nas alfaces, contudo, não é capaz de inibir a expressão de pendoamento precoce em materiais com baixa tolerância a temperaturas elevadas. Neste sentido, os resultados obtidos nesta pesquisa fornecem contribuições significativas para o aprimoramento do cultivo hidropônico de alface, resultando em elevação de produção e qualidade, mesmo em regiões de climas quentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, Y. J.; CLAUSSEN, K.; ZIMMERMAN, J. L. Genotypic differences in the heat-shock response and thermotolerance in four potato cultivars. **Plant Science**, v. 166, n. 4, p. 901–911, 2004.
- ALBERONI, R. B. **Hidroponia: Como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo**. Editora Nobel. São Paulo-SP. 102 p. 1998.
- AL MAHMUD, A. *et al.* Selection of Suitable Potato Genotypes for Late-Sown Heat Stress Conditions Based on Field Performance and Stress Tolerance Indices. **Sustainability**, v. 13, n. 5, p. 2770. 2021.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728. 2013.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemistry**. Washington: AOAC, 2012.
- BATISTA, T. *et al.* Avaliação nutricional da alface cultivada em soluções nutritivas suprimidas de macronutrientes. **Revista Biotemas**, v. 24, n. 2, p. 2175–7925, 2011.
- BEERS, R. F. JR.; SIZER, W. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. **J Biol Chem**. 195:33–140. 1952.
- CAKMAK, I.; HENGELER, C.; MARSCHNER, H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 45, n. 9, p. 1251–1257, 1994.

CAKMAK, I.; KIRKBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, v. 133, n. 4, p. 692–704, 2008.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. **Better Crops**, v. 94, n. 2, p. 23–25, 2010.

CAMEJO, D. *et al.* High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility. **Journal of Plant Physiology**, v. 162, n. 3, p. 281–289, 2005.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: Editora UFLA, 2005.

CONCEIÇÃO, S. S. *et al.* Silicon modulates the activity of antioxidant enzymes and nitrogen compounds in sunflower plants under salt stress. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 9, p. 1237–1247, 2019.

CORNELISSEN, J. H. C. *et al.* Foliar pH as a new plant trait: Can it explain variation in foliar chemistry and carbon cycling processes among subarctic plant species and types? **Oecologia**, v. 147, n. 2, p. 315–326, 2006.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4° ed. [s.l.] Artmed Editora, 2010.

DE BANG, T. C. *et al.* The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446–2469. 2021.

DE MENEZES FORTES, J. F. *et al.* Productive and physiological performance of lettuce cultivars under hydroponic cultivation in the semi-arid region of the Northeast. **Revista Agro@mbiente on-Line**, v. 14, 2020.

DESIKAN, R. *et al.* ABA, hydrogen peroxide and nitric oxide signalling in stomatal guard cells. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 395, p. 205–212, 2004.

FARHAT, N. *et al.* Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, n. 6, p. 145. 2016.

HERMANS, C. *et al.* Magnesium deficiency in sugar beets alters sugar partitioning and phloem loading in young mature leaves. **Planta**, v. 220, n. 4, p. 541–549. 2005.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The Water-culture Method for Growing Plants Without Soil. Circular. **California Agricultural Experiment Station**, v. 347, n. 2, p. 32, 1950.

HOLMES, S. C. *et al.* Selection of heat tolerant lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars grown in deep water culture and their marketability. **Horticulturae**, v. 5, n. 3, p. 1–11, 2019.

HÖRTENSTEINER, S.; KRÄUTLER, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. **Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics**, v. 1807, n. 8, p. 977–988, 2011.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. **Plant Physiol.** 57: 315-319. 1976.

- KUMAR TEWARI, R.; KUMAR, P.; NAND SHARMA, P. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants. **Scientia Horticulturae**, v. 108, n. 1, p. 7–14, 2006.
- LEMOS NETO, H. de S. *et al.* Can silicon (Si) influence growth, physiology and postharvest quality of lettuce? **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 1, p. 71–77, 2020.
- LIU, R. *et al.* LsHSP70 is induced by high temperature to interact with calmodulin, leading to higher bolting resistance in lettuce. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2020.
- MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.
- MARSCHNER, P. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. [s.l.] Elsevier, 2012.
- PAUL, M. J.; FOYER, C. H. Sink regulation of photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 360, p. 1383–1400. 2001.
- PESSARAKLI, M. **Handbook of Plant and Crop Physiology**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group. v. 3. 2014.
- REIS, H. F. *et al.* Conservação pós-colheita de alface crespa, de cultivo orgânico e convencional, sob atmosfera modificada. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 3, p. 303–309, 2014.
- SALA, F. C.; DA COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 187–194. 2012.
- SAMPAIO, I. M. G. *et al.* Productive and physiological responses of jambu (*Acmella oleracea*) under nutrient concentrations in nutrient solution. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 65–71, 2021.
- SIDDIQUI, M. H. *et al.* Mitigation of adverse effects of heat stress on *Vicia faba* by exogenous application of magnesium. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 7, p. 1393–1401. 2018.
- SILVA, D. M. da *et al.* The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress. **Scientia Horticulturae**, v. 224, p. 115–125, 2017.
- TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. [s.l.] Artmed Editora, 2017.
- TRÄNKNER, M. *et al.* Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. **Plant and Soil**, v. 406, n. 1–2, p. 409–423, 2016.
- TRÄNKNER, M.; TAVAKOL, E.; JÁKLI, B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia Plantarum**, v. 163, n. 3, p. 414–431, 2018.
- WAHID, A. *et al.* Heat tolerance in plants: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, v. 61, n. 3, p. 199–223, 2007.

YE, X. *et al.* Magnesium-deficiency effects on pigments, photosynthesis and photosynthetic electron transport of leaves, and nutrients of leaf blades and veins in citrus sinensis seedlings. **Plants**, v. 8, n. 10, 2019.