

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

MARIA ANTÔNIA SANTOS DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DE CAFEIROS CULTIVADOS SOB
ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

MARIA ANTÔNIA SANTOS DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DE CAFEIROS CULTIVADOS SOB
ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Adriene Woods Pedrosa

Coorientadores: Edgard Augusto de Toledo
Picoli

Marcelo de Freitas Ribeiro
Williams Pinto Marques

Ferreira

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C331d
2024
Carvalho, Maria Antônia Santos de, 1998-
Desenvolvimento vegetativo de cafeeiros cultivados sob
estresses térmico e hídrico / Maria Antônia Santos de Carvalho.
– Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (81 f.): il.

Orientador: Adriene Woods Pedrosa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2024.
Referências bibliográficas: f. 69-80.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.259>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Coffea arabica*. 2. Café - Cultivo. 3. Estresse
(Fisiologia). 4. Café - Crescimento. 5. Café - Nutrição.
I. Pedrosa, Adriene Woods, 1974-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 633.738911


MARIA ANTÔNIA SANTOS DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DE CAFEIROS CULTIVADOS SOB
ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2024

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **MARIA ANTONIA SANTOS DE CARVALHO**
Data: 15/07/2024 17:23:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Maria Antônia Santos de Carvalho
Autora

Documento assinado digitalmente
 **ADRIENE WOODS PEDROSA**
Data: 21/07/2024 16:52:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Adriene Woods Pedrosa
Orientadora

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo carinho, compreensão e incentivo, em especial, minha mãe Simone e minha avó Doralicy.

À minha namorada Vitória, pelo apoio, amor, pela presença e companheirismo, pela escuta e motivação.

Aos meus amigos que me ouviram desabafar e me proporcionaram alegrias, em especial, José Victor, que dividiu comigo o peso do mestrado, contando suas experiências.

À Prof^a. Adriene Woods Pedrosa, pela orientação, auxílio em momentos difíceis, conselhos e ensinamentos ao longo desses dois anos.

Ao Dr. Marcelo de Freitas Ribeiro, pela calma e paciência para lidar com as adversidades e pela ajuda constante durante a realização dos experimentos.

Ao Prof. Edgard Augusto Picoli de Toledo e ao Dr. Williams Pinto Marques Ferreira, pelos ensinamentos, auxílio e orientação recebidos.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia do Departamento de Agronomia, pela oportunidade e suporte fornecido.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais na unidade regional EPAMIG Sudeste (EPAMIG – Sudeste), pela oportunidade em participar do projeto de pesquisa, no qual minha dissertação foi desenvolvida.

Aos bolsistas dos projetos de pesquisa da EPAMIG e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), no qual minha dissertação foi desenvolvida, bem como, aos demais bolsistas da unidade regional EPAMIG Sudeste, que me auxiliaram na condução do experimento.

A todos os funcionários da UFV e da EPAMIG, que, de alguma forma, contribuíram para que o meu mestrado se concretizasse.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo Projeto FAPEMIG (APQ-01723-21) - DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO DE CAFEEIROS CULTIVADOS SOB ESTRESSE TÉRMICO.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo Projeto FAPEMIG (APQ-00327-14).

Ao Consórcio Pesquisa Café e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pelo Projeto (nº 10.18.20.050.00.00).

“O conhecimento pelo contrário, exige uma presença curiosa do sujeito em face do mundo. Requer sua ação transformadora sobre a realidade. Demanda uma busca constante. Implica invenção e reinvenção”. (*Paulo Reglus Neves Freire*)

RESUMO

CARVALHO, Maria Antônia Santos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Desenvolvimento vegetativo de cafeeiros cultivados sob estresses térmico e hídrico.** Orientadora: Adriene Woods Pedrosa. Coorientadores: Edgard Augusto de Toledo Picoli, Marcelo de Freitas Ribeiro e Williams Pinto Marques Ferreira.

O recente relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) destacou os riscos iminentes do aumento da temperatura global. As alterações causadas por esse fenômeno têm efeito na ocorrência e distribuição de chuvas, o que poderá afetar diretamente os campos de produção agrícola. Em especial, tem-se a espécie *Coffea arabica* L., que apresenta aptidão agrícola para regiões com temperaturas médias amenas e necessidade de adequada disponibilidade hídrica, podendo, assim, perder locais de produção, que atualmente são aptos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento vegetativo e estado nutricional de três cultivares de *C. arabica*, submetidas aos estresses hídrico e térmico (baseado nos cenários do IPCC) em ambiente protegido, sendo elas, MGS Paraíso 2, Catucaiam 24137 e Catucaí Amarelo 2SL, com a finalidade de reunir informações sobre seus desempenhos diante das mudanças climáticas. Para isso, duas condições de temperatura foram consideradas: estufa ambiente (temperatura mais próxima do ambiente natural externo) e estufa ambiente + 3 °C (3 °C a mais que a estufa ambiente). Em cada estufa foi instalado um experimento em delineamento de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, com as três cultivares mencionadas e dois níveis de estresse hídrico (com e sem estresse). Os resultados mostraram que o crescimento das cultivares foi prejudicado pelo estresse hídrico, com redução da altura da planta, diâmetro do caule, número de nós do ramo ortotrópico, número de nós nos ramos plagiotrópicos e número de ramos plagiotrópicos, índice SPAD, área foliar e produção de matéria seca. Os resultados também evidenciaram que o aumento da temperatura pode intensificar o efeito do estresse hídrico. Além disso, o estresse térmico também contribuiu com redução do crescimento radicular e do índice SPAD. Destaca-se que, em resposta aos dois estresses, ocorreu um aumento da concentração foliar de N e redução foliar de Ca e

de micronutrientes como, B, Fe e Mn em resposta ao estresse hídrico. A concentração foliar do K permaneceu inalterada.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; Cultivares; Estresse abiótico; Crescimento vegetal; Estado nutricional.

ABSTRACT

CARVALHO, Maria Antônia Santos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Desenvolvimento vegetativo de cafeeiros cultivados sob estresse térmico e hídrico.** Orientadora: Adriene Woods Pedrosa. Coorientadores: Edgard Augusto de Toledo Picoli, Marcelo de Freitas Ribeiro e Williams Pinto Marques Ferreira.

The recent report by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) highlighted the imminent risks of rising global temperatures. The changes caused by this phenomenon have an effect on the occurrence and distribution of rainfall, which could directly affect agricultural production fields. In particular, there is the species *Coffea arabica* L., which presents agricultural suitability for regions with mild average temperatures and the need for adequate water availability, thus potentially losing production sites, which are currently suitable. Therefore, the objective of this work was to evaluate the vegetative growth and nutritional status of three *C. arabica* cultivars, subjected to water and heat stress (based on IPCC scenarios) in a protected environment, namely, MGS Paraíso 2, Catucaiam 24137 and Catucaí Amarelo 2SL, with the purpose of gathering information about their performance in the face of climate change. For this, two temperature conditions were considered: ambient greenhouse (temperature closest to the external natural environment) and ambient greenhouse + 3 °C (3 °C higher than the ambient greenhouse). In each greenhouse, an experiment was carried out in a randomized block design, in a 3 x 2 split plot scheme, with the three cultivars mentioned and two levels of water stress (with and without stress). The results showed that the growth of the cultivars was impaired by water stress, with a reduction in plant height, stem diameter, number of nodes in the orthotropic branch, number of nodes in the plagiotropic branches and number of plagiotropic branches, SPAD index, leaf area and dry matter production. The results also showed that increasing temperature can intensify the effect of water stress. Furthermore, heat stress also contributed to a reduction in root growth and the SPAD index. It is noteworthy that, in response to both stresses, there was an increase in leaf N concentration and leaf reduction in Ca and micronutrients such as B, Fe and Mn in response to water stress. Leaf K concentration remained unchanged.

Keywords: *Coffea arabica* L.; Cultivars; Abiotic stress; Plant growth; Nutritional status.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	11
REVISÃO DE LITERATURA	13
CAPÍTULO 1	17
CRESCIMENTO E MORFOLOGIA DE CAFEEIROS ARÁBICA SUBMETIDOS AOS ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO	
RESUMO.....	17
1. INTRODUÇÃO	18
2. MATERIAL E MÉTODOS	20
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4. CONCLUSÕES.....	44
CAPÍTULO 2.....	45
ESTADO NUTRICIONAL DE CAFEEIROS ARÁBICA SUBMETIDOS AOS ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO	
RESUMO.....	45
1. INTRODUÇÃO	46
2. MATERIAL E MÉTODOS	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
CONCLUSÕES GERAIS	81

INTRODUÇÃO GERAL

O cafeeiro apresenta grande importância para economia brasileira, sendo o país o maior produtor e exportador mundial, com área plantada de 1,87 milhão de hectares e produção de cerca de 55,1 milhões de sacas (Conab, 2023). Minas Gerais é, atualmente, o estado com maior área plantada e maior produção, com quase 1,1 milhão de hectares e mais de 29 milhões de sacas de 60 Kg de café beneficiado na safra 2023. A área estimada de plantio *Coffea arabica* L. no país foi de mais de 1,4 milhão de hectares, dos quais Minas Gerais representou 72%. Na produção foram cerca de 38,9 milhões de sacas beneficiadas no país, e Minas Gerais alcançou cerca de 74% do total. Ademais, a cultura contribui para o desenvolvimento social, por possibilitar milhares de empregos, direta e indiretamente nos diferentes ramos da cadeia produtiva, do comércio, do consumo entre outros.

Ao longo dos últimos anos, um aumento das temperaturas tem sido observado, além dos cenários de mudanças climáticas apontando para a continuidade desta tendência. Isto pode causar danos à produção agrícola, especialmente ao café arábica, por requerer temperaturas amenas para o ótimo desenvolvimento e produção de frutos de alta qualidade, apresentando assim aptidão agrícola para áreas com temperatura média anual entre 18 °C e 22 °C e déficit hídrico anual máximo de 150 mm (Sediyama et al., 2001).

O Relatório de Avaliação publicado em 2023 pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), aponta consequências diretamente ligadas a agricultura, como é o caso do aumento da intensidade de secas e de extremos de temperatura (IPCC, 2023). O relatório traz o registro do aumento da temperatura global em 1,1 °C entre o período de 2011-2020 comparado com o período de 1850-1900. Além disso, apresenta projeções de cenários de aumento de temperatura baseados nas emissões de gás carbônico (CO₂). O cenário mais brando indica um aumento de 1,5 °C, caso as emissões líquidas de CO₂ reduzam para zero até 2050, por outro lado, o cenário intermediário, apresenta um aumento de 3,0 °C na temperatura global, caso as emissões do gás permaneçam nos níveis atuais até a metade do século. Tal incremento na temperatura global, intensifica a interação entre fatores climáticos, o que pode levar ao aumento do impacto na agricultura (IPCC, 2023). Em relação ao cafeeiro, estas alterações de temperatura poderão tornar algumas áreas inaptas ao cultivo do café arábica, o que torna necessário, ações para mitigar essas mudanças

e pesquisas para a seleção de materiais genéticos tolerantes aos estresses abióticos.

Os efeitos dos estresses abióticos, principalmente a seca e a elevação das temperaturas, alteram funções importantes para o desenvolvimento das plantas. O crescimento das plantas é diretamente prejudicado, pois os processos de alongamento e divisão celular necessitam de água. Também afetam a nutrição, pois a falta de água interfere nos processos de absorção de nutrientes e, quando associada com o estresse térmico, tem seu efeito maximizado. Além disso, essa combinação pode interferir na fotossíntese, com a diminuição da concentração de clorofilas, redução da condutância estomática e redução da taxa de transpiração e fotossintética (Hussain et al., 2019). Para mais, as reações do Fotossistema II são comprometidas, como também há o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, que causam sérios danos às proteínas e membranas celulares (Fahad et al., 2017). Todas essas alterações poderão afetar os processos de expansão e enchimento dos frutos, comprometendo assim a qualidade dos grãos de café.

Sabe-se que, as plantas possuem certa plasticidade que as tornam capazes de moldar aspectos fisiológicos, morfológicos e anatômicos para suportar estresses abióticos. Estudos demonstram que para se adaptar as variações de umidade e temperatura, o cafeeiro pode desencadear mecanismos com vistas à redução da perda de água por transpiração, manutenção do fluxo de nutrientes, o combate a espécies reativas de oxigênio, controle do potencial hídrico, entre outros (Santos et al., 2022; Tounekti et al., 2018).

Diante disso, percebe-se a importância do estudo do comportamento das cultivares comerciais para identificação de genótipos mais tolerantes, bem como novos materiais genéticos com estas características. Assim, objetivou-se com este trabalho, determinar o comportamento de cultivares de *Coffea arabica* L. submetidas aos estresses hídrico e térmico baseado nos cenários do IPCC de aumento de temperatura, no que se refere ao crescimento vegetativo, com a finalidade de reunir informações que irão subsidiar futuras pesquisas de melhoramento genético.

REVISÃO DE LITERATURA

Os principais grupos produtores de café no mundo são a América do Sul, Ásia e Oceania, África, e América Central e México, em ordem decrescente de acordo com a Organização Internacional do Café (OIC, 2021). Nesse cenário, o Brasil se apresenta como maior produtor mundial, seguido do Vietnã e Indonésia (FAO, 2022). No país, a cultura está concentrada nas regiões dos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná, Mato Grosso, Rio de Janeiro e Goiás. Dentre esses estados, Minas Gerais apresenta a maior área e maior produção de café total com cerca de 1,1 milhão de hectares e produção de mais de 29 milhões de sacas de 60 Kg de café beneficiado (Conab, 2023). A importância da cultura para a economia brasileira é evidente, o que justifica as ações no desenvolvimento de cultivares produtivas resistentes a pragas e doenças e adaptadas às condições climáticas de cada local.

O Relatório de Avaliação publicado em 2023 pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) alerta sobre as consequências do aumento da temperatura global, como a ocorrência de secas mais fortes em algumas regiões, chuvas intensas e extremos de temperatura (IPCC, 2023). Tais impactos afetam diretamente a produção agrícola, pois as plantas cultivadas no campo estão sujeitas às variações ambientais que influenciam seu crescimento e desenvolvimento. Esse contexto é semelhante para o cafeeiro e outras culturas que necessitam de condições ambientais ótimas de temperatura e umidade para proporcionar expressão máxima de sua capacidade produtiva.

Altas temperaturas e a seca são fatores importantes para o desenvolvimento das plantas, pois influenciam nas respostas morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (Taiz et. al., 2021). Em uma revisão sobre o efeito da seca e de altas temperaturas sobre as plantas, Fahad et al. (2017) destacaram os principais efeitos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos desses estresses abióticos sob as plantas. A água é o principal componente para as reações de expansão, alongamento e divisão celular. Dessa forma, o déficit hídrico tem influência direta no crescimento das plantas. Outros processos importantes são prejudicados, como a germinação do grão de pólen, redução da atividade de diversas enzimas e a relação de nutrientes na planta, pois interfere nos processos de absorção desses no solo, além de reduzir o

crescimento das raízes absorventes e da translocação de carboidratos para as raízes (Hassan et al., 2020).

Tais estresses abióticos também interferem nas respostas fisiológicas das plantas que estão diretamente relacionadas com o conteúdo de água no tecido vegetal, como é o caso da manutenção da temperatura, da condutância estomática e do potencial hídrico foliar (Fahad et al., 2017). Um dos processos mais importantes das plantas que é afetado pela seca e altas temperaturas é a fotossíntese. As alterações na fotossíntese são reflexo de modificações em vários outros processos, como a redução da biossíntese e maior degradação de clorofilas, o fechamento de estômatos, a queda de folhas e a redução da síntese da Rubisco (El-Sappah et al., 2022). As reações do Fotossistema II (PSII) também são afetadas e por consequência o fluxo de elétrons é prejudicado, reduzindo, assim, a atividade da ATP sintase. Outra implicação danosa para o sistema da planta é a produção de espécies reativas de oxigênio que degradam proteínas e membranas induzindo o colapso das células vegetais (Taiz et. al., 2021; Fahad et al., 2017).

Os estresses abióticos por aumento da temperatura e por déficit hídrico, isolados ou em interação, podem afetar o estado nutricional das plantas. A redução da disponibilidade hídrica no solo prejudica a mobilidade dos nutrientes, pois reduz a difusão deles das estruturas do solo para a superfície da raiz. Ademais, por reduzir a abertura estomática e consequentemente a transpiração, mesmo em condições de adequado fornecimento de nutrientes no solo, o déficit hídrico impacta no transporte dos nutrientes das raízes para a parte aérea (Ahanger et al., 2016).

Quanto ao estresse térmico, a concentração do nutriente na planta varia de acordo com a espécie, com o elemento, com o tempo e órgão de exposição, com a temperatura e com a associação com outros estresses. Sabe-se que a absorção da maioria dos nutrientes é mediada por proteínas transportadores presentes na raiz. Além disso, as proteínas H⁺-ATPases presentes na membrana das células, contribuem para a formação do gradiente de prótons necessário para o transporte secundário de nutrientes (Mishra et al., 2023). Nesse contexto, estudos mostram que o calor pode interferir na quantidade dessas proteínas na raiz, afetando, assim, a absorção dos nutrientes (Giri et al., 2017; Jayawardena et al., 2016). Apesar disso, os estudos sobre o estado nutricional das plantas em resposta ao calor são poucos, mas a literatura já aponta uma resposta complexa, com aumento, redução e não

alteração do teor dos nutrientes (He et al., 2022; Klock et al., 1996; Tovar et al., 2022).

As consequências dos estresses hídrico e térmico no cafeeiro dependem da espécie, da variedade/cultivar e da fase de desenvolvimento que a planta se encontra. O cafeeiro *C. canephora* não se adapta bem às condições de baixa temperatura que ocorrem em situações de alta altitude, por outro lado, o cafeeiro *C. arabica* se desenvolve melhor em áreas com altitude elevada, sendo esse um dos fatores que melhora a qualidade dos frutos. De modo geral, *C. canephora* apresenta maior rusticidade que o *C. arabica*, assim, se desenvolve melhor em temperaturas mais altas e é menos sensível ao déficit hídrico. Entretanto, existe um limite para tal tolerância, fazendo com que tanto *C. arabica* como *C. canephora* tenham seu desenvolvimento comprometido com temperaturas altas extremas e déficit hídrico intenso. Quando a temperatura é extrema, os danos podem ser altamente prejudiciais às plantas, como foi demonstrado por Yamane et al. (2022), onde ao submeter a cultivar *Typica* de *C. arabica* ao estresse térmico de 45 °C, foi observado redução das atividades das enzimas superóxido dismutase e catalase, redução do teor de clorofila e inibição do fotossistema II (PSII).

Vários estudos apresentam estratégias para atenuar os efeitos de estresses abióticos causados pelas mudanças climáticas. Em relação ao cafeeiro, Alemu e Dufera (2017) demonstraram que o cultivo sombreado do café proporciona redução de temperaturas extremas e luminosidade excessiva. Além disso, reduz a temperatura do solo, aumenta a taxa fotossintética e favorece a fixação de carbono da planta. Outra técnica ressaltada pelos autores é o plantio de culturas na entrelinha do cafeeiro, como por exemplo, a bananeira. Por fim, os autores também destacam o uso de plantas de cobertura, que proporcionam reciclagem de nutrientes, aumento da matéria orgânica e redução da evaporação do solo.

A estratégia de identificação de genótipos tolerantes aos estresses abióticos é outro caminho a ser seguido. Santos et al. (2022) investigando a tolerância ao estresse abiótico sazonal (estação seca e estação chuvosa) de acessos de 'Híbrido de Timor', no município de Patrocínio, Minas Gerais, perceberam que os genótipos com tolerância ao estresse apresentaram mecanismos semelhantes que visavam, principalmente, a redução da perda de água por transpiração, o combate ao dano causado por espécies reativas de oxigênio e a manutenção do fluxo de nutrientes e fotoassimilados no período seco.

Em estudo realizado com cultivares locais de *C. arabica* na Arábia Saudita, as cultivares mais tolerantes, foram selecionadas com mecanismos que contribuíram para manutenção do potencial hídrico mais adequado entre o período de maior estresse (meio-dia) e o período de recuperação (antemanhã) (Tounekti et al., 2018). As cultivares que demonstraram melhor recuperação de turgor, foram mais competentes no que tange à osmorregulação Teixeira et al. (2015) avaliaram a produtividade da espécie *C. arabica* no estado de Rondônia e identificaram 10 progênies com boa capacidade produtiva e estabilidade, em condições de temperatura mais elevada do que normalmente a espécie é cultivada. Além disso, o uso da irrigação alinhado com genótipos mais tolerantes ao calor e seca é uma alternativa para produção de café de alta qualidade em regiões não aptas (Pereira, 2023).

Dessa forma, o conhecimento sobre o comportamento das cultivares em resposta aos estresses abióticos é fundamental para os estudos de identificação de genótipos tolerantes que visam a manutenção e expansão do cultivo do cafeeiro em regiões no país.

CAPÍTULO 1

CRESCIMENTO E MORFOLOGIA DE CAFEIROS ARÁBICA SUBMETIDOS AOS ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO

RESUMO

Temperaturas extremas e a irregularidade da distribuição das chuvas são efeitos das mudanças climáticas que podem impactar as principais regiões de produção de café da espécie *Coffea arabica* L. no Brasil. Isso porque esses dois fatores influenciam diretamente os aspectos fisiológicos, anatômicos e morfológicos das plantas que podem afetar o crescimento delas. Sendo assim, objetivou-se com este trabalho investigar o comportamento de cultivares de *C. arabica* submetidas aos estresses hídrico e térmico, no que se refere ao crescimento e morfologia. Nesse caso, duas condições de temperatura foram utilizadas baseadas nos cenários do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), sendo elas, uma estufa ambiente (temperatura próxima da condição natural externa) e estufa ambiente + 3 °C (temperatura 3 °C superior à da estufa ambiente). Em cada uma das estufas foi instalado um experimento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, composto por três cultivares: MGS Paraíso 2, Catucaiam 24137 e Catucaí Amarelo 2SL, e duas condições de estresse hídrico: com e sem estresse. Neste estudo, o estresse hídrico aplicado reduziu o crescimento das cultivares em todas as características avaliadas, como altura da planta, diâmetro do caule, número de nós no ramo ortotrópico, número de nós nos ramos plagiotrópicos e número de ramos plagiotrópicos, produção de matéria seca, índice SPAD, área foliar e número de folhas. O aumento da temperatura intensificou o efeito do estresse hídrico, bem como reduziu o crescimento radicular e o índice SPAD.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; Estresse abiótico; Estresse Hídrico; Morfologia.

1. INTRODUÇÃO

As consequências do déficit hídrico e das altas temperaturas no cultivo do cafeeiro dependem da espécie, da variedade e da fase de desenvolvimento que a planta se encontra. No estado de Minas Gerais, o cafeeiro da espécie *Coffea arabica* L. se desenvolve naturalmente melhor em áreas de montanha, com altitude máxima de 1200 m, temperaturas amenas entre 18 °C e 23,5° C, com bom regime de chuvas de cerca de 1200 mm por ano e déficit hídrico máximo de 150 mm. Em regiões com temperatura média anual até os 24 °C, as áreas serão aptas com o uso de irrigação (Sedyama et al., 2001). Assad et al. (2004), por meio de simulações, mostraram que o aumento da temperatura média em 1 °C no estado de Minas Gerais, reduziria as áreas aptas nas regiões mais quentes do estado que precisam de irrigação, e aumentaria as áreas aptas na região Sul do estado, devido à redução das geadas. O estudo também analisou o aumento da temperatura média anual em 3 °C, onde, nessa condição, as áreas aptas com necessidade de irrigação reduziram ainda mais que o cenário anterior, as áreas com geadas apresentariam grande redução e a área total inapta atingiria 73,6% do estado (Assad et al., 2004).

Altas temperaturas e a seca são fatores importantes para o desenvolvimento das plantas, pois influenciam nas respostas morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Em uma revisão sobre o efeito da seca e de altas temperaturas sobre as plantas, Fahad et al. (2017), destacaram os principais efeitos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos. A água é o principal componente para as reações de expansão, alongamento e divisão celular. Dessa forma, o déficit hídrico tem influência direta no crescimento das plantas. Outros processos importantes são prejudicados, como a germinação do grão de pólen e redução da atividade de diversas enzimas (Fahad et al., 2017).

Naturalmente, a espécie possui recursos para driblar o efeito do aumento da temperatura durante a transição das estações do ano, principalmente em relação aos mecanismos que auxiliam o sistema fotossintético, como por exemplo, a abertura e fechamento dos estômatos, o combate ao dano causado por espécies reativas de oxigênio e a manutenção do fluxo de nutrientes e fotoassimilados no período seco (Rodrigues et al., 2018; Santos et al., 2022). Entretanto, quando a temperatura é extrema, os danos podem ser altamente prejudiciais às plantas. Yamane et al. (2022) submeteram a cultivar *Typica* de *C. arabica* ao estresse

térmico de 45°C, observaram redução das atividades das enzimas superóxido dismutase e catalase, redução do teor de clorofila e inibição do fotossistema II (PSII). Tais alterações fisiológicas refletem no crescimento e morfologia da planta, com redução na área foliar, na altura da planta, diâmetro e acúmulo de biomassa (Dias et al., 2007; Peloso et al., 2017).

Ressalta-se a necessidade da investigação dos danos em genótipos de *C. arabica* em resposta aos estresses abióticos, a fim de reunir informações que fomentarão as pesquisas de melhoramento genético que busquem a manutenção e desenvolvimento da cafeicultura brasileira frente às mudanças climáticas. Assim, objetivou-se avaliar a morfologia e crescimento de cultivares de *C. arabica* submetidas aos estresses térmico e hídrico em ambiente protegido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casas de vegetação na Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais na unidade regional EPAMIG Sudeste (EPAMIG – Sudeste), localizadas no campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. O município está localizado na região da Zona da Mata Mineira e se encontra nas coordenadas: Latitude 20°45'14" Sul e Longitude 42°52'53" Oeste, com altitude média de 648,74 m, com clima classificado como temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa), segundo Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006), com temperatura média anual de 20 °C e pluviosidade média anual de 1220 mm (Barros, 2022; Lorenzon, Dias, Leite, 2013).

No experimento foram utilizadas três cultivares da espécie *C. arabica*: Catucaí Amarelo 2SL, MGS Paraíso 2 e Catucaiam 24137. A cultivar Catucaí Amarelo 2SL, caracteriza-se como planta de porte baixo, cor do fruto amarelo, com vigor vegetativo alto, alta produtividade, diâmetro da copa médio, possui resistência moderada à ferrugem e é bem adaptada para as regiões Sul de Minas e Alta Mogiana. A cultivar MGS Paraíso 2 apresenta porte baixo, cor do fruto amarelo, vigor vegetativo alto, alta produtividade, diâmetro da copa médio, resistência à ferrugem, e ampla adaptação as principais regiões de cultivo de Minas Gerais. A cultivar Catucaiam 24137, apresenta porte baixo, frutos amarelos, alto vigor vegetativo, alta produtividade, diâmetro da copa pequeno, parcialmente resistente à ferrugem, e é bem adaptada para a região do Sul de Minas e regiões com altitudes elevadas (Carvalho et al., 2022).

Dois experimentos foram conduzidos simultaneamente durante cinco meses: o primeiro foi instalado em uma estufa denominada de ambiente com temperatura do ar controlada para permanecer sempre o mais próximo possível da temperatura do ambiente natural externo à estufa. O segundo foi instalado em uma estufa denominada ambiente + 3 °C com a temperatura do ar ajustada para 3 °C superior à da estufa ambiente. Em cada uma das duas estufas foi conduzido um experimento em delineamento de blocos casualizados, com seis repetições, disposto em esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, composto pelas três cultivares de café (Catucaí Amarelo 2SL, MGS Paraíso 2 e Catucaiam 24137) na parcela e duas condições hídricas na subparcela (com estresse hídrico e sem estresse hídrico por

déficit), sendo cada repetição composta por duas plantas (réplica), totalizando 72 plantas por estufa.

Assim, cada estufa possuía seis tratamentos:

T1 (MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico)

T2 (MGS Paraíso 2 com estresse hídrico)

T3 (Catucaí Amarelo 2SL sem estresse hídrico)

T4 (Catucaí Amarelo 2SL com estresse hídrico)

T5 (Catucaiam 24137 sem estresse hídrico)

T6 (Catucaiam 24137 com estresse hídrico)

As mudas foram transplantadas em vasos de 5 L, quando estavam com seis pares de folhas e passaram por processo de aclimatação em condição ambiente. O substrato utilizado foi da marca Multiplant® para plantas nativas composto por casca de pinus, vermiculita e areia fina, com pH de 6,40. No momento do transplante foi feita uma adubação por vaso de 30 g de superfosfato simples e 5 g de cloreto de potássio. Ao longo do experimento duas aplicações no substrato de 2 g por vaso de fertilizante formulado de N, P e K (19-04-19) foram feitas. Além disso, duas pulverizações foliares do fertilizante Flex Mais Café® foram realizadas na recomendação de 60 mL do produto em 20 L de calda para fornecimento dos micronutrientes B, Fe, Mn e Zn. Para controle de pulgões e cochinhilhas duas pulverizações de óleo de andiroba foram feitas utilizando a diluição de 2 mL do produto comercial em 1 L de água.

Para atingir a diferença de temperatura, foram utilizadas lâmpadas incandescentes de infravermelho na estufa ambiente + 3 °C, sendo instaladas 5 lâmpadas na estufa. As lâmpadas foram instaladas a 2 m do piso das estufas, foram distribuídas de forma homogênea e permaneceram ligadas durante todo o período do experimento. Para monitoramento da temperatura foram utilizados sensores de umidade e temperatura modelo DHT22 dentro das estufas e um sensor externo. Para o ajuste da temperatura, foi instalado um sistema automático de controle da temperatura na plataforma Arduino Mega, em que os exaustores eram acionados quando a diferença de temperatura desejada nas estufas era ultrapassada (Ribas, 2023). Para a simulação do estresse hídrico, foi realizada a redução da lâmina de água nas mudas, com aplicação de 250 mL de água em dias alternados, enquanto as plantas sem estresse hídrico, receberam 250 mL de água diariamente. O volume

aplicado foi ajustado a partir da determinação da quantidade de água na capacidade de campo do substrato no vaso com a planta.

Para caracterização da morfologia e do crescimento das plantas, foram avaliados ao final do experimento, o diâmetro do caule (DC) a 2,5 cm do coleto, a altura das plantas (AP), o número de nós no ramo ortotrópico (NNRO), o número de nós nos ramos plagiotrópicos (NNRP), o número de ramos plagiotrópicos (NRP), a área foliar (AF), o número de folhas (NF), a matéria seca das folhas, dos caules e das raízes, (MSF, MSC e MSR, respectivamente).

O DC foi mensurado utilizando um paquímetro digital. A AP foi mensurada medindo-se a altura da base do caule até o ápice caulinar. Para as variáveis NF e AF foram consideradas todas as folhas das plantas, sendo AF determinada no medidor de área foliar modelo LiCor 3100 (LiCor, Nebraska, EUA). Para a obtenção da matéria seca das diferentes partes das plantas, o material vegetal foi seco em uma estufa de circulação forçada a 65 °C por 72 horas.

Além das análises de crescimento, foi realizada a leitura do potencial hídrico das plantas aos três meses de experimento utilizando uma bomba de Scholander modelo 3999 desenvolvida pela Soil Moisture Equipment Corp. Uma folha no terço médio da planta, totalmente expandida, localizada no segundo ou terceiro nó de um ramo plagiotrópico foi coletada. O potencial hídrico foi determinado na antemanhã (PHAM), entre às 4 e 6 horas da manhã, bem como ao meio-dia (PHMD). Também foi realizada a avaliação do índice SPAD para determinação indireta do teor de clorofila, sendo essa análise realizada aos três meses de experimento. Para isso, foi utilizado o clorofilômetro portátil SPAD-502 [Soil-Plant Analysis Development (SPAD) Section Minolta Câmera CO. EDT, Japão]. A leitura foi realizada em folhas totalmente expandidas em dois ramos plagiotrópicos opostos, obtendo a média dos valores como resultado final.

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e ao teste F, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade, sendo avaliados os experimentos isolados e em conjunto. Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que refere à análise isolada das estufas ao final do experimento, para AP não foi observada interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico (Tabela 1). Dessa forma, analisando os fatores isoladamente, foi possível verificar diferença significativa para o fator estresse hídrico (letra maiúscula na coluna) na estufa aquecida, com redução significativa da média. Para o fator cultivar, não foi possível encontrar diferença significativa em nenhuma das estufas (letra minúscula na linha).

Tabela 1 – Altura da planta (AP, cm) das cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Altura (cm)						
Estresse hídrico	Cultivares			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	63,83	65,27	63,12	64,07A		
Sim	59,20	64,89	60,05	61,38A	6,11%	6,20%
Média	61,52a	65,08a	61,59a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	68,80	68,94	69,83	69,19A		
Sim	62,62	65,44	60,97	63,01B	6,97%	4,57%
Média	65,71a	67,19a	65,40a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para o diâmetro do caule não houve interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar na estufa ambiente (Tabela 2). Constatou-se redução significativa do diâmetro quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico analisando os fatores isoladamente nessa estufa. Na estufa ambiente + 3 °C, ocorreu interação significativa entre os fatores, onde a interação mostrou que na

situação sem estresse hídrico (letra minúscula na linha), a cultivar MGS Paraíso 2 se diferenciou da Catucaiam 24137 apresentando maior diâmetro, porém na situação com estresse hídrico (letra minúscula na linha), não houve diferença significativa entre as cultivares. Analisando as cultivares isoladamente na estufa ambiente + 3 °C em relação ao estresse hídrico (letra maiúscula na coluna), apenas a cultivar Catucaiam 24137 não apresentou redução significativa do diâmetro do caule quando submetida ao déficit hídrico.

Tabela 2 – Diâmetro do caule (DC, mm) das cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Diâmetro do caule (mm)						
Estresse hídrico	Cultivares			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	15,01	14,02	13,33	14,12A		
Sim	13,16	13,06	11,94	12,72B	10,12%	8,53%
Média	14,09a	13,54a	12,64a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	15,15aA	13,89abA	13,34bA	-		
Sim	11,23aB	12,59aB	12,57aA	-	7,71%	7,56%
Média	-	-	-	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Acerca do NNRO não houve interação significativa entre os fatores estresse térmico e hídrico (Tabela 3). Ocorreu uma redução significativa do NNRO quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico, ao analisar os fatores isoladamente. Apenas na estufa ambiente ocorreu diferença significativa entre as cultivares, em que, a MGS Paraíso 2 diferenciou-se da Catucaiam 24137, apresentando menor média.

Tabela 3 – Número de nós no ramo ortotrópico (NNRO) das cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Número de nós no ramo ortotrópico						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	11,92	12,83	12,92	12,56A		
Sim	11,17	11,92	12,58	11,89B	7,23%	7,46%
Média	11,54b	12,37ab	12,75a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	13,58	14,25	14,42	14,08A		
Sim	12,75	12,00	12,75	12,50B	10,83%	8,25%
Média	13,17a	13,12a	13,58a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para o NNRP não se observou diferença significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar (Tabela 4). Na estufa ambiente, a cultivar MGS Paraíso 2 diferenciou-se das demais apresentando maior média. Resultado semelhante ocorreu na estufa ambiente + 3 °C, em que a cultivar MGS Paraíso 2 diferenciou-se da Catucaiam 24137, apresentando maior média de NNRP em relação a cultivar Catucaiam 24137.

Tabela 4 – Número de nós nos ramos plagiotrópicos (NNRP) das cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Número de nós nos ramos plagiotrópicos						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catuciam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	14,58	11,00	11,25	12,28A		
Sim	13,00	11,25	10,08	11,44A	15,9%	18,59%
Média	13,79a	11,12b	10,67b	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	15,17	11,67	11,00	12,61A		
Sim	13,83	12,08	10,50	12,14A	10,69%	14,10%
Média	14,50a	11,87ab	10,75b	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

No que concerne ao NRP não foi observada interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico (Tabela 5). Mas analisando os fatores isoladamente, em todas as estufas ocorreu redução significativa da média na condição com estresse hídrico. Apenas na estufa ambiente observou-se diferença significativa entre cultivares, em que a MGS Paraíso 2 se diferenciou da Catucaí Amarelo 2SL, apresentando menor média.

Tabela 5 – Número de ramos plagiotrópicos (NRP das cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Número de ramos plagiotrópicos						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	17,83	21,17	19,75	19,58A		
Sim	15,67	17,33	17,83	16,94B	11,98%	13,39%
Média	16,75b	19,25a	18,79ab	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	21,00	21,83	22,17	21,67A		
Sim	18,92	19,50	20,92	19,70B	11,79%	10,48%
Média	19,96a	20,67a	21,54a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Finalmente, com relação ao índice SPAD, apesar de não ter sido observada interação significativa entre os fatores, as estufas apresentaram redução significativa do índice quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico, mas não foi identificada diferença significativa entre as cultivares (Tabela 6).

Tabela 6 – Índice SPAD nas cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Índice SPAD						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	47,50	47,86	45,05	46,47A		
Sim	45,34	39,62	41,63	42,20B	14,81%	10,78%
Média	45,92a	43,74a	43,34a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	41,37	40,42	42,44	41,42A		
Sim	38,14	38,43	41,35	39,31B	14,92%	12,16%
Média	39,76a	39,43a	41,90a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Na análise conjunta dos dois experimentos para as características mencionadas anteriormente não houve interação significativa entre os dois locais e os tratamentos aplicados (Tabelas 7 e 8). Dessa forma, analisando os fatores isoladamente, para as características AP, NNRO, NNRP e NRP (Tabela 7), a maior média ocorreu na estufa ambiente + 3 °C. Para o diâmetro do caule e o número de nós nos ramos plagiotrópicos, não houve diferença significativa entre as estufas. A respeito do índice SPAD, a estufa ambiente se diferenciou da estufa ambiente + 3 °C com redução do índice SPAD na estufa aquecida (Tabela 7).

Tabela 7 – Médias de altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de nós no ramo ortotrópico (NNRO), número de nós nos ramos plagiotrópicos (NNRP) e índice SPAD das plantas de café arábica submetidas a diferentes condições de temperatura, Viçosa – MG, 2023.

Temperatura	AP (cm)	DC (mm)	NNRO	NNRP	NRP	SPAD
Estufa ambiente	62,73b	13,42a	12,22b	11,86a	18,26b	44,33a
Estufa ambiente + 3 °C	66,10a	13,13a	13,29a	12,37a	20,72a	40,36b

Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Em relação ao fator tratamentos (Tabela 8), com exceção do NNRP, independente da cultivar, os tratamentos com maior média foram aqueles em que não se foi aplicado o estresse hídrico. Para AP, o tratamento com a cultivar Catucaiam 24137 se diferenciou dos demais apresentando menor média. Para DC, a cultivar MGS Paraíso 2 apresentou redução significativa quando submetida ao estresse hídrico. Além disso, o tratamento MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico se diferenciou do tratamento com a cultivar Catucaí Amarelo 2SL com estresse hídrico e dos tratamentos com a cultivar Catucaiam 24137 nas duas condições de estresse hídrico. Para o NNRO, observou-se diferença significativa entre as condições de estresse hídrico para a cultivar Catucaí Amarelo 2SL, com redução da média quando a cultivar foi submetida ao déficit hídrico. Para o NNRP, foi possível diferenciar significativamente a cultivar MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico, das demais cultivares em ambas as condições de estresse. Para o índice SPAD, as maiores médias foram observadas nos tratamentos sem estresse hídrico, porém não se observou diferença significativa entre os tratamentos.

Tabela 8 – Médias de altura da planta (AP), diâmetro do caule (D), número de nós no ramo ortotrópico (NNRO), número de nós nos ramos plagiotrópicos (NNRP) e índice SPAD das cultivares de café arábica submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Cultivares	Estresse hídrico	AP (cm)	DC (mm)	NNRO	NNRP	NRP	SPAD
MGS	Não	66,32a	15,08a	12,75ab	14,87a	19,42ac	43,94a
Paraíso 2	Sim	60,91bc	12,20c	11,96b	13,42ab	17,29c	41,74a
Catuaí	Não	67,10a	13,96ab	13,54a	11,33bc	21,50a	44,14a
Amarelo	Sim	65,17ab	12,82bc	11,96b	11,67bc	18,42bc	39,03a
2SL							
Catuciam	Não	66,48a	13,33bc	13,67a	11,12bc	20,86ab	43,75a
24137	Sim	60,51c	12,26c	12,67ab	10,29c	19,35ac	41,49a

Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

O crescimento das cultivares foi comprometido pela redução da lâmina de água. De modo geral, para todas as características AP, DC, NNRO, NNRP, NRP e índice SPAD (Tabelas 1 a 8), foi observada redução significativa da média quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico. Tal fato indica que, o crescimento das cultivares foi comprometido pela redução da lâmina de água. Peloso, Tatagiba e Amaral (2017), estudando mudas da cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 em casa de vegetação, com diminuição da disponibilidade hídrica, observaram redução significativa da altura da planta e do diâmetro do caule a nível de coleto. Pizetta et al. (2016), aplicando déficit hídrico em mudas da cultivar Catuaí Vermelho 785-15, também constataram redução da altura das plantas. De forma semelhante, Dias et al. (2007), observaram redução da taxa de crescimento das cultivares Catuaí Vermelho 785-15 e Siriema quando submetidas ao estresse hídrico. Outros trabalhos também mostram redução do crescimento, incluindo redução no número de ramos plagiotrópicos do cafeeiro arábica, quando submetido ao estresse hídrico (Fialho et al., 2010; Ribeiro et al., 2017).

O índice SPAD foi medido aos 90 dias de experimento, momento em que sintomas de clorose e escaldadura começaram a ser percebidos. Chutteang et al. (2023), avaliando genótipos da variedade Robusta (*Coffea canephora*), relataram

redução do índice SPAD em condições de estresse hídrico, correlacionada com a redução do teor de clorofilas. O Índice SPAD é uma medida indireta do teor de clorofilas e apresenta correlação significativa com essa característica para diversas plantas (Fontes, 2016). Em condições de aumento de temperatura e redução da disponibilidade hídrica, o fechamento estomático prolongado reduz a concentração interna de CO₂ o que prejudica o processo fotossintético (Taiz et. Al., 2021). Nesse contexto, ocorre aumento de energia livre que leva a produção de substâncias reativas de oxigênio e consequente degradação de clorofilas (Peloso et al., 2016; Taiz et. al., 2021). Não apenas as clorofilas são danificadas, mas também o aparato fotossintético como um todo, o que pode ocasionar em danos irreversíveis. Assim, a degradação de clorofilas pode ser uma estratégia para reduzir a energia capturada que não é aproveitada (Bhargava e Sawant, 2012).

A falta de água é responsável de forma direta ou indireta pela redução do crescimento. Diretamente, a água impacta nos processos de expansão e alongamento celular, em decorrência da redução do turgor celular. Indiretamente, a redução da disponibilidade hídrica afeta a produção e o fluxo de fotoassimilados, isso porque, a degradação de clorofilas resultante do estresse oxidativo reduz a taxa fotossintética, além disso, a menor circulação de água no xilema afeta o fluxo de compostos no floema, pois a interação entre esses vasos permite a diferença de potencial de pressão da região fonte para região dreno que permite o movimento (McDowell et al., 2022; Taiz et. al., 2021).

A cultivar MGS Paraíso 2 em condição de adequada disponibilidade hídrica, apresentou melhor desempenho em relação às cultivares Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137. Todavia, sob estresse hídrico não se observou diferença marcante entre as cultivares. O comportamento diferencial da cultivar MGS Paraíso 2 foi observado por Bothrel et al. (2019), em que, avaliando o crescimento inicial dessas mesmas cultivares e outras, constataram maior vigor vegetativo para a cultivar MGS Paraíso 2 com relação ao diâmetro do caule, comprimento do sistema radicular e altura de plantas. Apesar disso, não existem registros na literatura que indiquem qual das cultivares apresenta melhor resposta ao estresse hídrico.

A interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico observada na estufa ambiente + 3 °C para DC (Tabela 2), indica a influência da temperatura na resposta das cultivares quanto ao estresse hídrico, pois os efeitos da redução da disponibilidade hídrica são intensificados com o aumento da temperatura

(DaMatta et al., 2018). Outros resultados que corroboram com essa informação, são os valores do índice SPAD aos 90 dias (tabela 6) de experimento. O estresse térmico causa redução do teor de clorofila em diversas plantas, como foi demonstrado em trigo, arroz, milho e algodão, isso porque, quando a temperatura ultrapassa o limite da faixa ótima de crescimento, os cloroplastos são afetados pela produção de substâncias reativas de oxigênio, desnaturação de proteínas e perda da estabilidade das membranas (Killi, Raschi e Bussotti, 2020; Roy et al., 2021; Shanmugam et al., 2013; Westhuizen et al., 2020).

Todavia, foram observados maiores médias das características AP, NNRO, NRP na estufa mais aquecida (Tabela 7). Tal fato, pode estar associado com as lâmpadas incandescentes de infravermelho utilizadas no experimento. Sobre esse assunto, foi verificado que as lâmpadas também emitiam luz visível com irradiância de cerca de $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fótons a uma distância de 1 m. Como a estufa ambiente + 3 °C apresentava essas lâmpadas e a estufa ambiente não, a presença dessas lâmpadas pode ter induzido o crescimento das plantas, visto que a emissão de $32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fótons já é suficiente para estimular o crescimento do cafeeiro (Rezende et al., 2008). Além disso, o fato das lâmpadas de radiação infravermelha terem permanecido acessas ao longo de todo o experimento, pode ter afetado o fotoperíodo recebido pelas plantas, pois já foi demonstrado que o aumento do fotoperíodo para a espécie *C. arabica* estimula o crescimento vegetativo (Went, 1957; Söndahl et al., 1972).

Sobre a análise isolada dos experimentos para MSF, MSC, MSR, AF, NF, PHAM e PHMD (Tabelas 9 a 15), não se observou interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar. Para a MSF (Tabela 9), analisando os fatores isoladamente, identificou-se diferença significativa para o fator estresse hídrico nas condições de aquecimento (letra maiúscula na coluna), com redução da massa seca foliar das cultivares quando submetidas ao estresse hídrico. Entretanto, não foi observada diferença significativa entre as cultivares (letra minúscula na linha).

Tabela 9 – Matéria seca foliar (MSF, g) nas cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Matéria seca foliar (g)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	27,99	27,41	25,79	27,06A		
Sim	15,92	18,09	15,87	16,63B	25,85%	21,04%
Média	21,95a	22,75a	20,83a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	33,09	27,42	31,79	30,77A		
Sim	12,94	12,84	14,74	13,51B	24,02%	28,80%
Média	23,02a	20,13a	23,27a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a MSC, na estufa ambiente não houve interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico. O fator estresse hídrico apresentou diferença significativa, com redução da massa seca do caule quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico na estufa ambiente (Tabela 10). Além disso, percebeu-se uma diferença significativa entre as cultivares na estufa ambiente, em que a cultivar MGS Paraíso 2 se diferenciou da Catucaiam 24137, apresentando maior média. Ainda sobre a MSC, apenas na estufa ambiente + 3 °C ocorreu interação significativa entre os fatores. Nesse caso, observou-se que na condição sem estresse hídrico (letra minúscula na linha), a cultivar MGS Paraíso 2 se diferenciou da cultivar Catucaí Amarelo 2SL. Porém, não foi observada diferença significativa para as cultivares quando submetidas ao estresse hídrico (letra minúscula na linha). Analisando as cultivares isoladamente em relação ao estresse hídrico (letra maiúscula na coluna), na estufa ambiente + 3 °C apenas a cultivar

MGS Paraíso 2 apresentou diferença significativa quando submetida ao estresse hídrico.

Tabela 10 – Matéria seca do caule (MSC, g) nas cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Matéria seca do caule (g)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	44,08	33,09	27,85	35,01A		
Sim	29,16	27,08	21,48	25,91B	24,61%	23,89%
Média	36,62a	30,09ab	24,67b	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	40,59aA	26,75bA	31,37abA	-		
Sim	21,44aB	29,57aA	25,21aA	-	22,10%	25,39%
Média	-	-	-	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

No que se refere a MSR, não se observou interação significativa entre os fatores, bem como não houve diferença significativa para o fator cultivar (Tabela 11). Todavia, observou-se redução significativa da MSR para o fator estresse hídrico nas estufas.

Tabela 11 – Matéria seca da raiz (MSR, g) nas cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Matéria seca da raiz (g)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	40,45	41,69	49,42	43,86A		
Sim	28,92	32,46	24,89	28,76B	47,08%	24,05%
Média	34,69a	37,08a	37,16a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	31,02	26,26	35,96	31,08A		
Sim	16,06	24,57	20,76	20,47B	38,18%	34,23%
Média	23,54a	25,41a	28,36a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a área foliar e o número de folhas, não houve interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico, mas se observou redução significativa das médias quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico (Tabelas 12 e 13, respectivamente). Entretanto, não houve diferença significativa entre as cultivares.

Tabela 12 – Área foliar (AF, cm²) nas cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Área foliar (cm²)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	3296,68	3651,98	3429,8	3459,49A		
Sim	2011,21	2407,99	2160,01	2193,07B	21,29%	19,32%
Média	2653,95a	3029,99a	2794,91a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	4076,45	3885,44	4238,48	4066,79A		
Sim	1942,03	1897,91	2007,14	1949,02B	22,07%	24,39%
Média	3009,24a	2891,67a	3122,81a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Tabela 13 – Número de folhas (NF) nas cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico aos 150 dias de experimento, Viçosa – MG, 2023.

Número de folhas						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	175	176,17	166,67	172,61A		
Sim	124	139,17	126,17	129,78B	13,44%	17,75%
Média	149,5a	157,67a	146,42a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	208,33	184,17	181,83	191,44A		
Sim	128,17	104,33	122,67	118,39B	16,43%	22,50%
Média	168,25a	144,25a	152,25a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

No que tange à análise do potencial hídrico, as duas condições, antemanhã (Tabela 14) e meio-dia (Tabela 15), apresentaram respostas semelhantes, onde não houve interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico, bem como não foram observadas diferenças significativas para os fatores isolados. O potencial hídrico na antemanhã apresentou maiores valores se comparado com o potencial hídrico ao meio-dia. Além disso, nas duas condições foram observados valores menores do potencial hídrico das plantas quando submetidas ao estresse hídrico, com exceção da estufa ambiente na antemanhã (Tabela 14).

Tabela 14 – Potencial hídrico na antemanhã (PHAM, MPa) na cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, aos 90 dias de experimento, Viçosa – MG, 2023.

Potencial hídrico antemanhã (MPa)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	-0,26	-0,24	-0,20	-0,23A		
Sim	-0,24	-0,25	-0,20	-0,23A	64,96%	37,82%
Média	-0,25a	-0,24a	-0,19a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	-0,16	-0,20	-0,14	-0,17A		
Sim	-0,19	-0,16	-0,24	-0,20A	50,77%	54,87%
Média	-0,18a	-0,18a	-0,19a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Tabela 15 – Potencial hídrico ao meio-dia (PHMD, MPa) na cultivares de café arábica – MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 – submetidas ao estresse térmico e hídrico, aos 90 dias de experimento, Viçosa – MG, 2023.

Potencial hídrico meio-dia (MPa)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	Catucaí Amarelo 2SL	Catucaiam 24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	-0,25	-0,30	-0,27	-0,27A		
Sim	-0,31	-0,25	-0,32	-0,29A	62,44%	56,80%
Média	-0,28a	-0,28a	-0,29a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	-0,42	-0,34	-0,18	-0,31A		
Sim	-0,46	-0,30	-0,39	-0,38A	73,26%	58,97%
Média	-0,44a	-0,32a	-0,29a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

A respeito da análise em conjunto dos experimentos para verificar diferenças entre as condições de temperatura para MSF, MSC, MSR, AF, PHAM e PHMD, não foi observada interação significativa entre os locais e os tratamentos. Assim, analisando as duas estufas (Tabela 16), para as características MSF, MSC, AF, NF, PHAM e PHMD não houve diferença significativa entre as condições de temperatura. Para a MSR foi possível diferenciar a estufa ambiente da estufa ambiente + 3 °C.

Tabela 16 – Médias de matéria seca foliar (MSF), matéria seca do caule (MSC), matéria seca da raiz (MSR), área foliar (AR), número de folhas (NF), potencial hídrico na antemanhã (PHAM) e potencial hídrico ao meio-dia (PHMD) de cultivares de café arábica submetidas a diferentes condições de temperatura, Viçosa – MG, 2023.

Variáveis	Temperatura	
	Estufa ambiente	Estufa ambiente + 3 °C
MSF (g)	21,84a	22,14a
MSC (g)	30,46a	29,16a
MSR (g)	36,31a	25,77b
AF (cm²)	2826,28a	3007,91a
NF	151,19a	154,92a
PHAM (MPa)	-0,23a	-0,18a
PHMD (MPa)	-0,28a	-0,35a

Em relação ao fator tratamentos (Tabela 17), apenas as características PHAM e PHDM não apresentaram diferença significativa. Para as características MSF, AF e NF os tratamentos sem estresse hídrico, independente da cultivar foram considerados diferentes dos tratamentos com estresse hídrico, com redução das médias na condição com estresse hídrico. Para a característica MSC a cultivar MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico se diferenciou das demais cultivares com e sem estresse hídrico. Para a característica MSR, o tratamento com a cultivar Catucaiam 24137 sem estresse hídrico apresentou maior média, diferenciando-se dos tratamentos Catucaiam 24137, MGS Paraíso 2 e Catucaí Amarelo 2SL com estresse hídrico.

Tabela 17 – Médias de matéria seca foliar (MSF), matéria seca do caule (MSC), matéria seca da raiz (MSR), área foliar (AR), número de folhas (NF), potencial hídrico na antemanhã (PHAM) e potencial hídrico ao meio-dia (PHMD) de cultivares de café arábica submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Cultivares	Estresse hídrico	MSF (g)	MSC (g)	MSR (g)	AF (cm²)	NF	PHAM (MPa)	PHMD (MPa)
MGS Paraíso 2	Não	30,54a	42,34a	35,74ab	3686,57a	191,67a	-0,21a	-0,33a
	Sim	14,43b	25,30b	22,49b	1976,62b	126,08b	-0,21a	-0,38a
Catucaí Amarelo 2SL	Não	27,42a	29,92b	33,95ab	3768,71a	180,17a	-0,22a	-0,32a
	Sim	15,47b	28,32b	28,52b	2152,95b	121,75b	-0,20a	-0,27a
Catuciam 24137	Não	28,79a	29,61b	42,69a	3834,14a	174,25a	-0,17a	-0,23a
	Sim	15,31b	23,34b	22,82b	2083,58b	124,42b	-0,22a	-0,35a

Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.
Fonte: Autora

Para as características, MSF, MSC, MSR, AF e NF, a redução das médias ressalta o impacto da redução da disponibilidade hídrica no crescimento das cultivares (Tabelas 9 a 13). Peloso, Tatagiba e Amaral (2017), também observaram redução da matéria seca foliar, dos ramos e radicular, bem como da área foliar, para a cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 submetida ao estresse hídrico. Outros estudos também evidenciam a redução do crescimento de outras espécies submetidas ao estresse hídrico, como o tomate em relação à altura da planta, número de folhas, área foliar e matéria seca foliar (Sarker et al., 2020), como também para o milho em relação à altura da planta e índice de área foliar (Laskari et al., 2022).

A MSR apresentou maior média na estufa ambiente, se diferenciando significativamente da estufa aquecida (Tabela 16). Sobre esse assunto, sabe-se que a temperatura também é responsável pela mudança do fluxo de fotoassimilados para as raízes, com conseqüente redução da biomassa radicular (Hassan et al., 2020). Tal resultado, bem como a interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar na estufa ambiente + 3 °C para a MSC (Tabela 10), reforça o efeito da temperatura observado na Tabela 2, bem como o resultado apresentado na Tabela 7 com redução do índice SPAD na estufa ambiente + 3 °C.

Nas avaliações referentes ao crescimento caulinar, DC (Tabela 2) e MSC (Tabela 10), o fato da cultivar MGS Paraíso 2 ter apresentado melhor desempenho com adequada disponibilidade hídrica, mas ter redução significativa das médias quando submetida ao déficit hídrico na estufa aquecida, pode indicar maior sensibilidade às variações ambientais comparado com as outras cultivares. Dessa forma, o estudo do comportamento de cultivares diante de estresses abióticos visando o zoneamento agroclimático, é uma estratégia para contornar os efeitos das mudanças climáticas.

Os valores mais próximos de zero do potencial hídrico observados na antemanhã, são esperados em condições ideais de irrigação como também em condições de aplicação de estresse hídrico. Durante o período noturno ocorre a recuperação do turgor celular para os casos em que a planta não atingiu o ponto de murcha permanente (Bergonci et al., 2000; Charrier, 2020; Silva et al., 2008; Taiz et al., 2021). Entretanto, esperava-se valores mais negativos para o potencial hídrico ao meio-dia, principalmente na condição de redução da disponibilidade hídrica. Golberg et al. (1988) verificaram que potenciais hídricos foliares abaixo de -1,5 MPa têm o potencial de reduzir a taxa fotossintética do cafeeiro. Apesar de não ter sido

verificado um potencial hídrico menor que $-1,5$ MPa, como foi constatada a redução do crescimento das plantas na condição com menor disponibilidade hídrica, pode ter ocorrido um erro no momento da análise que justifica o resultado encontrado ou a amostragem pode não ter sido suficiente para indicar a diferença. Em condições adversas, as plantas podem apresentar plasticidade fenotípica para tolerar os efeitos dos estresses abióticos. Porém, tais processos demandam recursos energéticos que podem comprometer seu crescimento (Kleunen e Fischer, 2005). Assim, a não alteração do potencial hídrico pode ser uma resposta aos estresses abióticos, em que a planta mantém parâmetros fisiológicos, mas com crescimento reduzido para garantir sua sobrevivência.

4. CONCLUSÕES

O estresse hídrico causa redução no crescimento das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137, com efeito sobre a altura da planta, diâmetro do caule, número de nós no ramo ortotrópico, números de nós nos ramos plagiotrópicos, número de ramos, índice SPAD, matéria seca da raiz, de caule e de folhas, área foliar e número de folhas.

O aumento da temperatura em 3 °C, acima da temperatura ambiente, intensifica o efeito do estresse hídrico nas características: diâmetro do caule e massa seca caulinar.

O aumento da temperatura em 3 °C, acima da temperatura ambiente, reduz o crescimento radicular das cultivares.

O estresse hídrico e térmico, baseado nos cenários do IPCC, afetam negativamente o crescimento das cultivares avaliadas.

CAPÍTULO 2

ESTADO NUTRICIONAL DE CAFEEIROS ARÁBICA SUBMETIDOS AOS ESTRESSES TÉRMICO E HÍDRICO

RESUMO

O aumento da temperatura e redução da disponibilidade hídrica tem chamado a atenção quanto aos impactos no setor agrícola, haja vista o cenário de mudanças climáticas. Esses dois fatores são os principais agentes abióticos que interferem no comportamento das plantas. Dentre as culturas agrícolas, a espécie *Coffea arabica* L. apresenta o risco de perder áreas aptas para o seu crescimento nas principais regiões de cultivo do Brasil. Dessa forma, objetivou-se com este trabalho avaliar o estado nutricional de cultivares da espécie, submetidas aos estresses hídrico e térmico. Duas condições de temperatura foram utilizadas baseadas nos cenários de aumento de temperatura do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC): estufa ambiente (temperatura próxima a condição natural externa) e estufa + 3 °C (temperatura 3 °C a mais que a estufa ambiente). Em cada uma das estufas foi instalado um experimento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, com três cultivares de *C. arabica* (MGS Paraíso 2, Catucaiam 24137 e Catucaí Amarelo 2SL) e duas condições de estresse hídrico (com e sem estresse). A concentração de N aumentou em resposta ao estresse hídrico. A concentração de K, Mg, S e Zn não foram afetadas com o estresse hídrico. Ca, B, Fe, Mn e Cu tiveram suas concentrações reduzidas com o estresse hídrico. O aumento da temperatura intensificou o efeito do estresse hídrico, mas não alterou a concentração de N, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B. A concentração de Zn aumentou na condição de estresse térmico. Com isso, percebeu-se no presente estudo, respostas complexas com relação à concentração de macro e micronutrientes nas cultivares nas condições de estresse hídrico e térmico aplicadas.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; Estresse abiótico; Macronutrientes; Micronutrientes.

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a disponibilidade hídrica é componente importante para o cafeeiro, sendo um fator limitante ao crescimento e a sua falta afeta negativamente a produtividade das lavouras. Os danos são intensificados com a adição de altas temperaturas, tornando os dois fatores abióticos, os mais influentes no que se refere ao crescimento, desenvolvimento e produção (DaMatta e Ramalho, 2006). A disponibilidade de nutrientes também se caracteriza como um fator que compromete o crescimento e produtividade do cafeeiro, podendo ser intensificado direta ou indiretamente pela ação do déficit hídrico e o calor. Isso porque, a absorção dos nutrientes depende da quantidade de água presente no solo, o que pode reduzir o transporte de nutrientes por difusão e fluxo de massa. Ademais, a absorção pode ser prejudicada pela mudança da atividade metabólica das plantas, que é regulada pela temperatura e a disponibilidade hídrica (DaMatta e Ramalho, 2006; Martinez et al., 2020; Prasad, Stanggenborg e Ristic 2008).

Com adequado fornecimento de nutrientes, o cafeeiro pode apresentar prejuízos no seu crescimento em condições de restrição hídrica. Assim, apropriada disponibilidade hídrica tem o potencial de melhorar o estado nutricional da planta. Além disso, os dois fatores bem ajustados promovem o uso eficiente da água (Júnior et al., 2022; Liu et al., 2016). O estresse térmico além de afetar o balanço hídrico das plantas, altera a condição nutricional, uma vez que, altas temperaturas reduzem biomassa radicular, presença de pelos absorventes, interfere na atividade de enzimas envolvidas na assimilação de nutrientes, reduz o fornecimento de carboidrato para as raízes, entre outros (Hassan et al., 2020).

O efeito do estresse hídrico associado ao estresse térmico no estado nutricional das plantas ainda é pouco elucidado. O estudo da interação desses dois fatores se faz necessário pois, em condições naturais, dificilmente um ocorrerá isolado do outro (Prasad, Stanggenborg e Ristic 2008). Com o risco iminente das mudanças climáticas e de seus impactos nas lavouras, ressalta-se a importância do conhecimento do comportamento das variedades em relação ao status nutricional quando submetidas aos estresses hídrico e térmico. Dessa forma, objetivou-se com este trabalho avaliar a nutrição de três cultivares de *Coffea arabica* L. submetidos aos estresses hídrico e térmico em ambiente protegido, com a finalidade de reunir informações que irão auxiliar nas tomadas de decisão no que refere à adubação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casas de vegetação na Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais na unidade regional EPAMIG Sudeste (EPAMIG – Sudeste), localizadas no campus da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

As cultivares de *Coffea arabica* Catucaiam 24137, Catucaí Amarelo 2SL e MGS Paraíso 2, caracterizadas como cultivares de porte baixo, diâmetro da copa de pequeno a médio, alto vigor vegetativo e altamente produtivas, foram utilizadas em dois experimentos conduzidos simultaneamente durante cinco meses (Carvalho et al., 2022). O primeiro foi instalado em uma estufa denominada de ambiente com temperatura do ar controlada para permanecer sempre o mais próximo possível da temperatura do ambiente natural externo à estufa. O segundo foi instalado em uma estufa denominada ambiente + 3 °C com a temperatura do ar ajustada para 3 °C a mais que a estufa ambiente.

Em cada estufa um experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com seis repetições, disposto em esquema de parcelas subdivididas 3 x 2, composto pelas três cultivares de café na parcela e duas condições hídricas na subparcela (com estresse hídrico e sem estresse hídrico por déficit), sendo cada repetição composta por duas plantas (réplica), totalizando 72 plantas por estufa.

Assim, cada estufa possuía seis tratamentos:

- T1 (MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico)
- T2 (MGS Paraíso 2 com estresse hídrico)
- T3 (Catucaí Amarelo 2SL sem estresse hídrico)
- T4 (Catucaí Amarelo 2SL com estresse hídrico)
- T5 (Catucaiam 24137 sem estresse hídrico)
- T6 (Catucaiam 24137 com estresse hídrico)

As mudas foram transplantadas em vasos de 5 L, quando estavam com seis pares de folhas e passaram por processo de aclimação em condição ambiente. O substrato utilizado foi da marca Multiplant® para plantas nativas composto por casca de pinus, vermiculita e areia fina, com pH de 6,40. No momento do transplante foi feita uma adubação por vaso de 30 g de superfosfato simples e 5 g de cloreto de potássio. Ao longo do experimento duas aplicações no substrato de 2 g por vaso de fertilizante formulado de N, P e K (19-04-19) foram feitas. Além disso, duas

pulverizações foliares do fertilizante Flex Mais Café® foram realizadas na recomendação de 60 mL do produto em 20 L de calda para fornecimento dos micronutrientes B, Fe, Mn e Zn. Para controle de pulgões e cochinhilhas duas pulverizações de óleo de andiroba foram feitas utilizando a diluição de 2 mL do produto comercial em 1 L de água.

Para atingir as diferenças de temperatura, foram utilizadas lâmpadas incandescentes de infravermelho na estufa ambiente + 3,0 °C, sendo instaladas 5 lâmpadas. As lâmpadas foram instaladas a 2 m do piso das estufas, foram distribuídas de forma homogênea e permaneceram ligadas durante todo o período do experimento. Para monitoramento da temperatura foram utilizados sensores de umidade e temperatura modelo DHT22. Para o ajuste da temperatura, foi instalado um sistema automático de controle na plataforma Arduino Mega (Ribas, 2023). Para a simulação do estresse hídrico, foi realizada a redução da lâmina de água nas mudas com aplicação de 250 mL de água em dias alternados, enquanto as plantas sem estresse hídrico, receberão 250 mL de água diariamente. O volume aplicado foi ajustado a partir da determinação da quantidade de água na capacidade de campo do substrato no vaso com a planta.

Ao final do experimento, todas as folhas das plantas foram colhidas e levadas para secagem em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C por 72 h. Em seguida, as amostras foram moídas utilizando um moinho de facas tipo Wiley com peneira de 20 mesh. A determinação da concentração de nutrientes foi realizada no Viçosa Laboratório de Análises de Solo. O nitrogênio foi determinado pelo método Kjeldahl (digestão com ácido sulfúrico na presença de selênio, cobre e sódio) e destilação utilizando hidróxido de sódio recebendo ácido clorídrico (AOAC, 1995). P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu e Mn foram determinados por digestão nitroperclórica (Johnson; Ulrich, 1959). P foi quantificado por espectrofotometria no comprimento de onda de 725 nm. K foi quantificado por fotometria com emissão de chama. Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Mn foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica. B foi determinado por meio da queima do material em mufla a 600 °C com posterior análise em espectrofotômetro no comprimento de onda de 420 nm, utilizando azometina H (Malavolta et al., 1997).

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e ao teste F, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey em nível 5% de probabilidade,

sendo os experimentos avaliados isolados e em conjunto. Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os experimentos isoladamente, no que diz respeito a concentração de nitrogênio foliar (Tabela 1), não houve interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar. Entretanto, houve diferença significativa para o fator estresse hídrico nas duas condições de temperatura. Nesse caso, a condição com estresse hídrico apresentou maior concentração de nitrogênio foliar.

Tabela 1 – Concentração foliar de nitrogênio (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Nitrogênio (dag/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	1,54	1,82	1,80	1,72B		
Sim	2,01	2,20	2,35	2,19A	23,64%	17,78%
Média	1,77a	2,01a	2,07a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	1,42	2,19	1,68	1,76B		
Sim	2,54	2,40	2,26	2,40A	22,66%	20,47%
Média	1,98a	2,30a	1,97a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a concentração de fósforo foliar houve interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico na estufa ambiente + 3 °C (Tabela 2). Nessa estufa, não foi identificada diferença significativa entre as cultivares (letra minúscula

na linha). Porém, analisando as cultivares de forma isolada em relação ao estresse hídrico (letra maiúscula na coluna), a cultivar MGS Paraíso 2 apresentou diferença significativa para o estresse hídrico, com aumento da concentração no nutriente na condição com estresse hídrico. A cultivar Catucaiam 24137 também apresentou diferença significativa para o estresse hídrico, com redução da concentração do nutriente na condição com estresse hídrico. Por outro lado, a cultivar Catucaí Amarelo 2SL não apresentou diferença significativa para o estresse hídrico. Na estufa ambiente não houve interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar, bem como os fatores isolados promoveram efeitos semelhantes.

Tabela 2 – Concentração foliar de fósforo (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Fósforo (dag/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	0,40	0,52	0,57	0,51A		
Sim	0,47	0,53	0,54	0,51A	26,48%	15,45%
Média	0,44a	0,55a	0,55a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	0,54aB	0,66aA	0,69aA	-		
Sim	0,67aA	0,56aA	0,53aB	-	22,86%	15,64%
Média	-	-	-	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a concentração de potássio foliar, não houve interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar (Tabela 3). Em relação ao fator estresse hídrico, não houve diferença significativa em nenhuma das condições de temperatura, e para o fator cultivar, observou-se diferença significativa na estufa ambiente em que a

MGS Paraíso 2, com média de 1,94 dag/kg, se diferenciou da cultivar Catucaí Amarelo 2SL com média de 2,20 dag/kg (letra minúscula na linha). Este resultado demonstra que a absorção de K não foi afetada pelo estresse hídrico.

Tabela 3 – Concentração foliar de potássio (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Potássio (dag/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	1,86	2,21	2,19	2,09A		
Sim	2,02	2,09	2,21	2,11A	9,19%	13,09%
Média	1,94b	2,15ab	2,20a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	1,88	2,25	2,15	2,09A		
Sim	2,24	2,03	2,10	2,11A	19,77%	13,39%
Média	2,06a	2,14a	2,13a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a concentração foliar de cálcio, na estufa aquecida (+3 °C) ocorreu interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar (Tabela 4). Nesse caso, na condição sem estresse hídrico, as cultivares não apresentaram diferença significativa, porém na condição com estresse hídrico, diferenciou-se a cultivar MGS Paraíso 2 da Catucaí Amarelo 2SL, com médias de 2,05 dag/kg e 1,67 dag/kg, respectivamente (letra minúscula na linha). Analisando as cultivares isoladamente quanto ao fator estresse hídrico (letra maiúscula na coluna), apenas a cultivar Catucaiam 24137 apresentou diferença significativa com redução da concentração de cálcio foliar quando submetida ao déficit hídrico. A estufa ambiente apresentou diferença significativa para o fator estresse hídrico (letra maiúscula na coluna) com

redução da concentração de cálcio quando as cultivares foram submetidas ao estresse.

Tabela 4 – Concentração foliar de cálcio (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Cálcio (dag/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar				CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137	Média	Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	1,83	1,88	2,04	1,92A		
Sim	1,64	1,93	1,80	1,79B	9,61%	9,52%
Média	1,74a	1,90a	1,92a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	1,91aA	1,88aA	2,10aA	-		
Sim	2,05aA	1,67bA	1,74abB	-	12,45%	11,00%
Média	-	-	-	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

No que refere à concentração de magnésio foliar (Tabela 5) não houve interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar, bem como não houve diferença significativa para os fatores isolados em nenhum dos locais. De forma semelhante ao resultado do magnésio, a concentração foliar de enxofre nas estufas ambiente e ambiente + 3 °C não foi alterada (Tabela 6).

Tabela 5 – Concentração foliar de magnésio (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Magnésio (dag/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	0,44	0,43	0,47	0,45A		
Sim	0,45	0,45	0,41	0,44A	12,08%	10,00%
Média	0,44a	0,44a	0,44a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	0,48	0,43	0,47	0,46A		
Sim	0,52	0,42	0,47	0,47A	15,52%	12,06%
Média	0,50a	0,42a	0,47a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Tabela 6 – Concentração foliar de enxofre (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Enxofre (dag/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	0,20	0,21	0,23	0,21A		
Sim	0,20	0,22	0,20	0,20A	13,26%	15,05%
Média	0,20a	0,22a	0,21a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	0,18	0,21	0,20	0,20A		
Sim	0,25	0,22	0,20	0,22A	19,73%	19,06%
Média	0,21a	0,21a	0,20a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

No que se refere à concentração de zinco foliar, não houve interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar, bem como não houve diferença significativa para os fatores estresse hídrico e cultivar (Tabela 7).

Tabela 7 – Concentração foliar de zinco (mg//kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Zinco (mg/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	73,87	65,00	70,60	69,82A		
Sim	65,73	77,73	70,07	71,18A	19,76%	17,45%
Média	69,80a	71,37a	70,33a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	83,07	82,33	92,93	86,11A		
Sim	88,87	80,07	78,40	82,44A	13,86%	16,66%
Média	85,97a	81,20a	85,67a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a concentração de ferro foliar, a estufa ambiente não apresentou interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar, como não foi identificada diferença significativa para os fatores isolados (Tabela 8). Na estufa ambiente + 3 °C, ocorreu redução significativa para a concentração de ferro foliar na condição com estresse hídrico (letra maiúscula na coluna). Distinguiu-se a cultivar MGS Paraíso 2 da cultivar Catucaí Amarelo 2SL (letra minúscula na linha), apresentando maior média de concentração de ferro foliar.

Tabela 8 – Concentração foliar de ferro (mg/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Ferro (mg/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar				CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137	Média	Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	166,87	157,27	190,53	171,56A		
Sim	152,87	167,33	138,93	153,04A	16,91%	20,88%
Média	159,87a	162,30a	164,73a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	187,00	155,67	178,80	173,82A		
Sim	162,33	131,80	146,93	147,02B	12,52%	12,84%
Média	174,67a	143,74b	162,87ab	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Sobre a concentração do micronutriente manganês no tecido foliar, não ocorreu interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar (Tabela 9). Em nenhuma das estufas foi identificada diferença significativa entre as cultivares (letra minúscula na linha). Houve redução da concentração foliar de manganês quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico, com diferença significativa na estufa ambiente.

Tabela 9 – Concentração foliar de manganês (mg/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Manganês (mg/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar				CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137	Média	Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	158,60	120,27	137,60	138,82A		
Sim	118,27	113,87	103,07	111,73B	38,93%	28,43%
Média	138,43a	117,07a	120,33a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	174,00	118,60	174,33	155,64A		
Sim	131,73	131,40	119,60	127,58A	25,87%	30,02%
Média	152,87a	125,00a	146,97a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Em relação a concentração foliar de cobre, apesar da não ocorrência de interação significativa entre os fatores, observou-se redução significativa da concentração do elemento quando as cultivares foram submetidas ao estresse hídrico (letra maiúscula na coluna) (Tabela 10). Todavia, as cultivares não apresentaram diferença significativa para concentração de cobre foliar (letra minúscula na linha).

Tabela 10 – Concentração foliar de cobre (mg/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Cobre (mg/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar			Média	CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137		Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	2,48	2,07	3,33	2,63A		
Sim	1,53	1,13	0,80	1,16B	70,54%	51,16%
Média	2,01a	1,60a	2,07a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	2,20	1,87	1,67	2,24A		
Sim	1,33	0,70	0,73	0,92B	61,33%	68,60%
Média	1,77a	1,28a	1,70a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Para a concentração foliar de boro, não foi identificada interação significativa entre os fatores estresse hídrico e cultivar (Tabela 11). Nas duas estufas, observou-se redução significativa da concentração de boro foliar na condição com estresse hídrico (letra maiúscula na coluna). Na estufa ambiente + 3 °C, a cultivar Catucaí Amarelo 2SL se diferenciou das demais, porém apresentando menor média.

Tabela 11 – Concentração foliar de boro (mg/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Boro (mg/kg)						
Estresse hídrico	Cultivar				CV (%)	
	MGS Paraíso 2	2SL	24137	Média	Parcela (Cultivar)	Subparcela (Estresse hídrico)
Estufa ambiente						
Não	173,85	146,36	177,12	165,78A		
Sim	105,89	113,38	111,24	110,17B	12,20%	17,49%
Média	139,87a	129,87a	144,18a	-		
Estufa ambiente + 3 °C						
Não	170,03	135,55	173,85	159,81A		
Sim	107,39	94,73	95,94	99,35B	10,51%	13,04%
Média	138,71a	115,14b	134,89a	-		

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Sabe-se que a redução da disponibilidade hídrica leva a uma redução da absorção de nutrientes pelas plantas, inclusive para o N, afetando também o seu uso eficiente (Costa et al., 1997; Martinez, Bohorquez e Cecon, 2024; Shigaki et al., 2004;). Contudo, nesse experimento foi observado o resultado oposto para o nitrogênio. Sobre esse assunto, Fahad et al. (2017) ressaltam que, no geral, a absorção de nitrogênio pelas plantas em condição de estresse hídrico é aumentada. Além disso, evidências de aumento dos níveis de nitrogênio em condições de estresse hídrico foram observadas em trabalhos com gramíneas (Singh, Paleg e Aspinall, 1972). Tal aumento pode estar relacionado com o acúmulo de aminoácidos que não foram convertidos em proteínas, bem como pelo fato de o menor crescimento não proporcionar uma diluição adequada do nutriente (Alam, 1999; Barnett e Naylor, 1966).

A interação significativa entre os fatores cultivar e estresse hídrico na estufa ambiente + 3 °C (Tabela 2) pode indicar o efeito da maior temperatura na resposta

das cultivares, pois, temperaturas mais altas podem intensificar o efeito da redução da disponibilidade hídrica (DaMatta et al., 2018). A concentração de fósforo não reduziu com o estresse hídrico, sendo apenas observada na cultivar Catucaiam 24137 na estufa ambiente + 3 °C (letra maiúscula na coluna). Além disso, a cultivar MGS Paraíso 2 apresentou comportamento diferente, com aumento da concentração de fósforo quando submetida ao estresse hídrico (letra maiúscula na coluna). Tal comportamento pode indicar melhor resposta de absorção e alocação do nutriente para essa cultivar. A literatura aponta comportamento diferencial entre espécies de plantas e condições de estresse hídrico. Há exemplos de não alteração, do aumento e da redução, essa última principalmente em condições de estresse hídrico severo (Alan, 1999).

Alterações não significativas para a concentração foliar de potássio foram observadas em milho e soja sob condições de estresse hídrico, o que pode ser uma resposta da planta para manter funções como regulação do potencial osmótico e do potencial eletroquímico da membrana plasmática das células (Osakabe e tal., 2013; Tanguilig et al., 1987). Quando a planta passa por condições de estresse hídrico, ela pode aumentar a expressão de transportadores de potássio na raiz (Qi et al., 2019). Tal mecanismo pode influenciar a atividade de aquaporinas. Wang et al. (2013) indicaram que existe uma correlação entre a atividade dos canais de água (aquaporinas) e os transportadores de potássio presentes na membrana celular, em que, a ativação de um, influencia o outro, como resposta de osmorregulação (Wang et al., 2013).

Novamente, a ocorrência da interação significativa entre os fatores estresse térmico e hídrico na estufa mais aquecida para a concentração de cálcio foliar (Tabela 4), ressalta a influência da temperatura na resposta das cultivares quando submetidas ao estresse hídrico. A mobilidade do cálcio no floema é baixa, por isso a demanda do nutriente nos tecidos é atendida, majoritariamente, pelo transporte do nutriente no xilema a partir da solução do solo. Assim, a falta de água tem papel importante na distribuição do nutriente na planta, o que pode ter levado a redução da concentração foliar do nutriente (Rengel, Cakmak e White, 2022).

Com relação à concentração foliar de enxofre (Tabela 6), estudos também evidenciaram a não alteração da concentração foliar de enxofre na espécie arbórea *Fagus sylvatica* L. (Peuke e Rennenberg, 2004), bem como o aumento da concentração do nutriente na espécie arbórea *Quercus ilex* (Sardans et al., 2008).

Tal fato pode estar relacionado com a não redistribuição do nutriente na parte aérea, devido a redução do crescimento induzida pela restrição hídrica (Silva et al., 2011).

O aumento da temperatura prejudica a absorção de água mesmo em condições de boa disponibilidade hídrica, o que por consequência irá interferir na absorção, transporte e assimilação de nutrientes por alterar diversos processos fisiológicos, como por exemplo, redução da fotossíntese, inativação de enzimas, desnaturação de proteínas, acúmulo de substâncias reativas de oxigênio, alterações no balanço hormonal, entre outros (El-Sappah et al., 2022; Fahad et al., 2017).

O resultado encontrado para o ferro (Tabela 8) reforça a influência da temperatura na resposta ao estresse hídrico, em que, na condição sem aquecimento, as cultivares apresentaram comportamento semelhante, não sendo afetadas pelo estresse hídrico aplicado. Mas quando colocadas em um ambiente aquecido, elas foram afetadas significativamente pelo estresse hídrico, além de ter sido possível distingui-las.

Covre et al., (2018) evidenciaram redução da concentração de Fe foliar em cultivares de *Coffea canephora* quando submetidas ao estresse hídrico. Hummel et al., (2018) estudando cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris*), observaram redução da concentração de Fe nos grãos sob condições de estresse hídrico. Giri et al., (2017) identificaram a redução da concentração de ferro foliar no tomateiro induzido ao estresse térmico, o que pode estar relacionado com redução do crescimento radicular e da transpiração. A forma de Fe absorvida pelas dicotiledôneas é Fe^{2+} , que em condições de alagamento do solo é aumentada, pois ocorre a redução do Fe^{3+} , devido a diminuição da solubilidade e difusão do oxigênio (O_2), e consequente redução do potencial redox do solo. Portanto, a redução da disponibilidade de água pode ter aumentado a circulação de oxigênio no substrato, favorecendo assim, a oxidação do Fe^{+2} , reduzindo a absorção do nutriente (Xu et al., 2018).

Para o manganês, sabe-se que o aumento da quantidade de água no solo, com redução da difusão e solubilidade do O_2 , favorece a redução das formas iônicas Mn^{4+} e Mn^{3+} , o que leva ao aumento da presença da forma iônica Mn^{2+} , sendo essa a absorvida pelas plantas. Nesse estudo, a redução da disponibilidade de água pode ter promovido o aumento da solubilidade e difusão do O_2 , beneficiando a oxidação do Mn^{2+} (Alejandro e al., 2020). Outrossim, o manganês apresenta baixa mobilidade no floema, o que faz com que sua presença nos tecidos foliares seja diretamente influenciada pela transpiração. Assim, a falta de água pode ter contribuído com a

redução da concentração do micronutriente na planta, devido ao fechamento de estômatos e consequente redução da transpiração (Rengel, Cakmak e White, 2022).

No que se refere à concentração de cobre foliar (Tabela 10), Covre et al. (2018) relataram a redução da concentração de cobre foliar em cultivares do cafeeiro canéfora submetidas ao estresse hídrico. Da mesma forma, Giri et al. (2017), observaram redução da concentração de cobre foliar para o tomateiro. Poucos estudos investigam alterações na concentração de cobre no cafeeiro, seja o arábica ou canéfora, quanto ao estresse hídrico. Apesar disso, a redução da concentração evidenciada nesse estudo, ressalta a necessidade de maiores indagações, visto que, o micronutriente altera significativamente a qualidade do café produzido, interferindo na produção de compostos que determinam a qualidade dos grãos, como açúcares e cafeína (Clemente et al., 2018).

O boro apresenta baixa mobilidade no floema, assim sua distribuição para os tecidos ocorre, principalmente, pelo fluxo de água no xilema (Rengel, Cakmak e White, 2022; Taiz et. al., 2021). Dessa forma, a redução da disponibilidade hídrica, por alterar o processo transpiratório e reduzir a absorção de água pelas plantas, pode ter levado a uma menor absorção e distribuição do nutriente. Tal efeito também foi observado em diversas plantas, como por exemplo, cultivares de *C. canephora*, tomate e canola (Covre et al., 2018; Huang, Wang e Bell, 1997; Giri et al., 2017).

A respeito da análise conjunta dos dois experimentos quanto a concentração foliar dos nutrientes, observou-se interação significativa entre experimentos e tratamentos apenas para a concentração de cálcio foliar. Assim, analisando a concentração de cálcio dos diferentes tratamentos dentro da estufa ambiente (letra minúscula na linha), observou-se que o tratamento MGS Paraíso 2 com estresse hídrico se diferenciou do tratamento Catucaiam 24137 sem estresse hídrico, apresentando menor média. Na Estufa ambiente + 3 °C, o tratamento Catucaí Amarelo 2SL com estresse hídrico se diferenciou significativamente do tratamento Catucaiam 24137 sem estresse hídrico, apresentando menor média. Analisando a variação do ambiente dentro dos níveis de tratamentos (letra maiúscula na coluna), apenas dois tratamentos apresentaram diferença significativa. Nesse caso, o tratamento MGS Paraíso 2 com estresse hídrico, aumentou a concentração de cálcio na Estufa ambiente + 3 °C e o tratamento Catucaí Amarelo 2SL com estresse hídrico, reduziu a concentração de cálcio na estufa aquecida.

Tabela 12 – Concentração foliar de cálcio (dag/kg) das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse térmico e hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Experimentos	Tratamentos						Média
	Estresse hídrico						
	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
	MGS Paraíso 2		Catucaí Amarelo 2SL		Catucaiam 24137		
Estufa ambiente	1,64bB	1,83abA	1,93abA	1,88abA	1,80abA	2,04aA	-
Estufa ambiente + 3 °C	2,05abA	1,91acA	1,67cB	1,88acA	1,74bcA	2,10aA	-
Média	-	-	-	-	-	-	-

Médias seguidas da mesma letra maiúscula, na coluna, e minúscula, na linha, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

Analisando os fatores isoladamente para os demais nutrientes, para o fator experimento (Tabela 13), os nutrientes N, K, Mg, S, Fe, Mn, Cu e B não apresentaram diferença significativa quanto a variação de temperatura (letra minúscula na coluna). Para o P, as duas estufas apresentaram diferença significativa, com a estufa ambiente apresentando menor concentração de fósforo (letra minúscula coluna. Para o zinco, a estufa ambiente se diferenciou da estufa ambiente + 3 °C apresentando menor média.

Para os nutrientes que apresentaram diferença significativa quanto ao experimento (níveis de temperatura) (Tabela 12), sendo eles, P e Mn, as menores médias foram observadas na estufa ambiente se diferenciando significativamente da estufa aquecida. O estresse térmico leva à redução da absorção de nutrientes. Entretanto, por ser considerado um fator que causa efeitos complexos nas plantas e que depende da duração do estresse, da temperatura e da associação com outros estresses, resultados diferentes também podem ser observados (Mishra et al., 2023). Klock et al. (1996) observaram aumento do conteúdo de Mn, P e Zn em melão quando as raízes das plantas foram submetidas ao aumento de temperatura. Tovar et al. (2022) relataram aumento do teor de P, Mn, S e Zn nas sementes em quinoa quando submetida a altas temperatura. He et al. (2022) estudando rúcula e

Tabela 13 – Médias da concentração foliar dos macronutrientes N, P, K, Mg e S (dag/kg) e dos micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu e B (mg/kg) nas cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas a diferentes temperaturas, Viçosa – MG, 2023.

Temperatura	N	P	K	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu	B
	mg/kg									
Estufa ambiente	1,95a	0,51b	2,10a	0,44a	0,21a	70,50b	162,30a	125,28a	1,89a	137,97a
Estufa ambiente + 3 °C	2,08a	0,61a	2,11a	0,47a	0,21a	84,28a	160,42a	141,61a	1,47a	129,58a

Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.
Fonte: Autora

No que diz respeito à análise dos tratamentos (cultivares x estresse hídrico), não foi observada diferença significativa para os nutrientes K, Mg, S e Zn (Tabela 14). Para o nitrogênio, os tratamentos sem estresse hídrico apresentaram as maiores médias, se diferenciando dos tratamentos das cultivares MGS Paraíso 2 e Catucaiam 24137 com estresse hídrico. Para o fósforo, os tratamentos das cultivares Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 sem estresse hídrico se diferenciaram do tratamento MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico.

Considerando as concentrações foliares de micronutrientes, para o ferro, as maiores concentrações foram observadas nos tratamentos sem estresse hídrico. Além disso, observou-se diferença significativa entre a cultivar Catucaiam 24137 sem estresse hídrico, do tratamento com a mesma cultivar com o estresse hídrico e da cultivar MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico. Para o manganês, foi possível diferenciar o tratamento com a cultivar MGS Paraíso 2 sem estresse hídrico do tratamento com a cultivar Catucaiam 24137 com estresse hídrico. Para o cobre, a maior média foi observado para a cultivar Catucaiam 24137 sem estresse hídrico que se diferenciou das demais cultivares associadas ao estresse hídrico. Finalmente para o boro, as maiores médias foram observadas nos tratamentos sem estresse hídrico. Já as menores médias foram observadas nos tratamentos com estresse hídrico. Nesse caso, os tratamentos sem estresse hídrico apresentaram diferença significativa em relação aos tratamentos com estresse hídrico.

Para os nutrientes que apresentaram diferença significativa quanto ao experimento (níveis de temperatura) (Tabela 12), sendo eles, P e Mn, as menores médias foram observadas na estufa ambiente se diferenciando significativamente da estufa aquecida. O estresse térmico leva a redução da absorção de nutrientes. Entretanto, por ser considerado um fator que causa efeitos complexos nas plantas e que depende da duração do estresse, da temperatura e da associação com outros estresses, resultados diferentes também podem ser observados (Mishra et al., 2023). Klock et al. (1996), observaram aumento do conteúdo de Mn, P e Zn em melão quando as raízes das plantas foram submetidas ao aumento de temperatura. Tovar et al. (2022), relataram aumento do teor de P, Mn, S e Zn nas sementes em quinoa quando submetida a altas temperatura. He et al. (2022) estudando rúcula e alface, encontraram maiores concentrações de Mg em resposta ao aumento da temperatura, que pode ser explicado pela redução do crescimento das plantas, devido à redução da diluição do nutriente nos tecidos. Além disso, o estresse

térmico altera a alocação de fotoassimilados para as raízes e reduz o crescimento de pelos absorventes, fatores importantes para o bom funcionamento do sistema radicular (Hassan et al., 2020).

Os resultados da Tabela 14, reforçam o que foi encontrado na análise das estufas isoladas (Tabelas 1 a 11). Onde o nitrogênio apresentou maior concentração na condição com estresse hídrico, o enxofre não foi afetado e para Fe, Mn, Cu e B tiveram suas concentrações reduzidas significativamente na condição com estresse hídrico. Diferentemente do que foi observado nos resultados das Tabelas 1 a 11, na Tabela 13 foi possível perceber maiores diferenças entre as cultivares quanto a resposta ao estresse hídrico. Com relação as três cultivares avaliadas nesse estudo, não há registros de melhor resposta ao estresse hídrico entre elas. Além disso, caracterizam-se por necessitar de boa disponibilidade hídrica. A cultivar MGS Paraíso 2 é adaptada as condições do bioma Cerrado em plantio irrigado, mas também se desenvolve bem em condições com temperaturas mais amenas, como é o caso do Sul de Minas Gerais (Carvalho et al., 2022). Apesar disso, os resultados encontrados não evidenciam comportamento marcadamente diferente dessa cultivar em relação às demais quanto ao estresse térmico e hídrico.

Tabela 14 – Médias da concentração foliar dos macronutrientes N, P, K, Mg e S (dag/kg) e micronutrientes Zn, Fe, Mn, Cu e B (mg/kg), nas cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137 submetidas ao estresse hídrico, Viçosa – MG, 2023.

Cultivares	Estresse hídrico	Macronutrientes (dag/kg)					Micronutrientes (mg/kg)				
		N	P	K	Mg	S	Zn	Fe	Mn	Cu	B
MGS Paraíso 2	Não	1,48c	0,47b	1,87a	0,46a	0,19a	78,47a	176,93ab	166,30a	2,34ab	171,94a
	Sim	2,27a	0,57ab	2,13a	0,48a	0,22a	77,30a	157,60ac	152,00ab	1,43b	106,64c
2SL	Não	2,01ab	0,62a	2,23a	0,43a	0,21a	73,67a	156,47ac	119,43ab	1,97ab	140,96b
	Sim	2,30a	0,55ab	2,06a	0,44a	0,22a	78,90a	149,57bc	122,63ab	0,92b	104,06c
24137	Não	1,74bc	0,63a	2,17a	0,47a	0,22a	81,77a	184,67a	155,97ab	3,00a	175,49a
	Sim	2,31a	0,54ab	2,16a	0,44a	0,20a	74,23a	142,93c	111,33b	0,77b	103,59c

Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, não se diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Autora

4. CONCLUSÕES

As concentrações de N foliar das cultivares MGS Paraíso 2, Catucaí Amarelo 2SL e Catucaiam 24137, aumentam na condição de estresse hídrico, mas não são afetadas pelo estresse térmico.

Os estresses hídrico e térmico não afetam nas concentrações foliares de K.

As concentrações foliares de P são pouco afetadas pelo estresse hídrico, e aumentaram com o estresse térmico

As concentrações foliares de Mg, S e Zn não são afetadas pelo estresse hídrico e térmico.

As concentrações foliares de Ca, B, Fe, Mn e Cu reduzem com o estresse hídrico.

O estresse térmico não afeta as concentrações de Fe, Cu e B.

As concentrações foliares de Mn não são afetadas pelo estresse térmico.

A aplicação do estresse hídrico e do estresse térmico, baseado nos cenários do IPCC, provocaram efeitos complexos no estado nutricional das cultivares estudadas, com redução, aumento e não alteração da concentração de nutrientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHANGER, M. A.; MORAD-TALAB, N.; ABD-ALLAH, E. F.; AHMAD, P.; HAJIBOLAND, R. (2016). Plant growth under drought stress: Significance of mineral nutrients. **Water stress and crop plants: a sustainable approach**, [S.L.] v. 2, p. 649-668, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781119054450.ch37>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119054450.ch37>. Acesso em: 30 jan. 2024

AHMED, S.; BRINKLEY, S.; SMITH, E.; SELA, A.; THEISEN, M.; THIBODEAU, C.; WARNE, T.; ANDERSON, E.; VAN DUSEN, N.; GIULIANO, P. Climate Change and Coffee Quality: systematic review on the effects of environmental and management variation on secondary metabolites and sensory attributes of coffee arabica and coffee canephora. **Frontiers In Plant Science**, [S.L.], v. 12, n. 708013, p. 1-20, 8 out. 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.708013>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2021.708013/full>. Acesso em: 8 mai. 2023.

ALAM, S. M. Nutrient uptake by plants under stress conditions. *In*: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of plant and crop stress**. 4. ed. Boca Raton: CRC press Taylor & Francis Group, 1999.

ALEJANDRO, S.; HÖLLER, S.; MEIER, B.; PEITER, E. Manganese in Plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers In Plant Science**, [S.L.], v. 11, n. 300, p. 1-23, 26 mar. 2020. [Http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2020.00300](http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2020.00300). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00300/full>. Acesso em: 03 fev. 2024.

ALEMU, A.; DUFERA, E. Climate smart coffee (Coffea arabica) production. **American Journal of Data Mining and Knowledge Discovery**, [S.L.] v. 2, n. 2, p. 62-68, fev. 2017. 10.11648/j.ajdmkd.20170202.14. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Abraham-Alemu/publication/362734207_Climate_Smart_Coffee_coffea_arabica_Production/links/62fccffaa4b1206fab8f1db/Climate-Smart-Coffee-coffea-arabica-Production.pdf. Acesso em: 30 jan. 2024

ALMEIDA, J. A. S.; AZEVEDO, M. T. V. L. G.; SALOMON, M. V.; MEDINA, Priscila Fratin. Water stress in germination, growth and development of coffee cultivars. **Journal Of Seed Science**, Campinas, v. 40, n. 1, p. 82-89, mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-1545v40n176667>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jss/a/93b67dLd5mRKpVNwFhx5zDn/?lang=en>. Acesso em: 3 jan. 2024.

AOAC – ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis. 16. ed. Washington: AOAC, 1975. 1200 p.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Campinas, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2004001100001>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/pab/a/T9BXP8Dz7fMkxPNYQDfnn5s/?lang=pt>. Acesso em: 3 jan. 2024.

BARNETT, N. M.; NAYLOR, A. W. Amino Acid and Protein Metabolism in Bermuda Grass During Water Stress. **Plant Physiology**, [S.L.], v. 41, n. 7, p. 1222-1230, 1 set. 1966. <http://dx.doi.org/10.1104/pp.41.7.1222>. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/41/7/1222/6091037?login=false>. Acesso em: 23 jan. 2024.

BARROS, I. M. S. **Crescimento e aspectos fisiológicos do eucalipto em resposta às mudanças climáticas em sistema mini-face**. 2022. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2022/08/DISSERTACAO-ISABELA-MIRIAN-DOS-SANTOS-BARROS.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; SANTOS, A. O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 35, n. 8, p. 1531-1540, ago. 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/trfJ8msZvQsc6fHnPGvwMDq/>. Acesso em: 16 jan. 2024.

BHARGAVA, S.; SAWANT, K. Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. **Plant breeding**, [S.L.], v. 132, n. 1, p. 21-32, 12 out. 2012. <https://doi.org/10.1111/pbr.12004>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pbr.12004>. Acesso em: 18 abr. 2024.

BOTHREL, H. M., COELHO, L. S., CARVALHO, G. R., BOTELHO, C. E., SANTOS, C. S. D., MOREIRA, P. C., FERREIRA, W. H. B.; MAIA, P.L.; FERREIRA, D. Soares, D. V. Crescimento de cultivares de *Coffea arabica* L. *In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL*. 2019, Vitória. Anais [...]. Vitória: Consórcio Pesquisa Café, 2019. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12689>. Acesso em: 21 jan. 2024.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café: quarto levantamento**. Brasília: Sumac e Gepin, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>. Acesso em: 26 jan. 2024.

CARVALHO, C. H. S; BARTELEGA, L.; SERA, G. H.; MATIELLO, J. B.; ALMEIDA, S. R.; SANTINATO, F.; HOTZ, A. L. **Catálogo de cultivares de café arábica**. Brasília: Embrapa Café, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1145722/catalogo-de-cultivares-de-cafe-arabica>. Acesso em: 23 jan. 2024.

CHARRIER, G. Extrapolating Physiological Response to Drought through Step-by-Step Analysis of Water Potential. **Plant Physiology**, [S.L.], v. 184, n. 2, p. 560-561, out. 2020. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1104/pp.20.01110>. Disponível em: <https://academic.oup.com/plphys/article/184/2/560/6117847?login=false>. Acesso em: 22 jan. 2024.

CHUTTEANG, C.; ROONPRAPANT, P.; TEINSEREE, N.; ARUNYANARK, A. Association between chlorophyll stability and drought tolerance in Robusta coffee. **Agriculture And Natural Resources**, Bangkok, v. 57, n. 2, p. 331-342, abr. 2023. <http://dx.doi.org/10.34044/j.anres.2023.57.2.13>. Disponível em: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/259316>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CLEMENTE, J. M.; MARTINEZ, H. E. P.; PEDROSA, A. W.; NEVES, Y. Poltroberieri; CECON, P. R.; JIFON, J. L. Boron, Copper, and Zinc Affect the Productivity, Cup Quality, and Chemical Compounds in Coffee Beans. **Journal of Food Quality**, Viçosa, MG, v. 2018, p. 1-14, abr. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7960231>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jfq/2018/7960231/>. Acesso em: 25 jan. 2024.

COSTA, L. D.; VEDOVE, G. D.; GIANQUINTO, G.; GIOVANARDI, R.; PERESSOTTI, A. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress. **Potato Research**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 19-34, mar. 1997. <Http://dx.doi.org/10.1007/bf02407559>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02407559>. Acesso em: 23 jan. 2024.

COVRE, A. M.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; GONTIJO, I. Micronutrients in the fruits and leaves of irrigated and non-irrigated coffee plants. **Journal Of Plant Nutrition**, São Mateus, v. 41, n. 9, p. 1119-1129, 9 mar. 2018. <Http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2018.1431665>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904167.2018.1431665>. Acesso em: 25 jan. 2024.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal Of Plant Physiology**, Viçosa, MG, v. 18, n. 1, p. 55-81, mar. 2006. <Http://dx.doi.org/10.1590/s1677-04202006000100006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjpp/a/bDfpJwLr4xLcznSwy4b9zkg/>. Acesso em: 07 jan. 2024.

DAMATTA, F. M.; AVILA, R. T.; CARDOSO, A. A.; MARTINS, S. C. V.; RAMALHO, J. C. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: a review. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, Viçosa, MG, v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 8 mar. 2018. <Http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jafc.7b04537>. Acesso em: 28 jun. 2023.

DIAS, P. C.; ARAUJO, W. L.; MORAES, G. A.B.K.; BARROS, R. S.; DAMATTA, F. M. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. **Journal Of Plant Physiology**, Viçosa, MG, v. 164, n. 12, p. 1639-1647, dez. 2007. <Http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2006.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0176161706003324>. Acesso em: 03 jan. 2024.

EL-SAPPAH, A. H.; RATHER, S. A.; WANI, S. H.; ELRYS, A. S.; BILAL, M.; HUANG, Q.; DAR, Z. A.; ELASHTOKHY, M. M. A.; SOAUD, N.; KOUL, M. Heat Stress-Mediated Constraints in Maize (*Zea mays*) Production: challenges and solutions.

Frontiers In Plant Science, Yibin, v. 13, n. 879366, 29 abr. 2022.

<http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2022.879366>. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.879366/full>. Acesso em: 25 jan. 2024.

FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S. Crop Production under Drought and Heat Stress: plant responses and management options. **Frontiers In Plant Science**, [S.L.], v. 8, p. 1147-1163, 29 jun. 2017. [Http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.01147](http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2017.01147). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.01147/full??>. Acesso em: 01 set. 2023.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT 2022.

Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/>. Acesso em: 29 jan. 2024.

FIALHO, G. S.; SILVA, D. P.; REIS, E. F.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G. Comportamento de plantas de café arábica submetidas a déficit hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Idesia (Arica)**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 35-39, dez. 2010. [Http://dx.doi.org/10.4067/s0718-34292010000300005](http://dx.doi.org/10.4067/s0718-34292010000300005). Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292010000300005&script=sci_arttext. Acesso em: 20 jan. 2024.

FONTES, P. C. R. **Nutrição mineral de plantas: anamnese e diagnóstico**. Viçosa: UFV, 2016. 315 p.

GOLBERG, A. D.; RENARD, C.; LANNOYE, R.; LEDENT, J. F. Effects and after-effects of water stress on chlorophyll fluorescence transients in *Coffea canephora* Pierre and *Coffea arabusta* Capot and Aké Assi. **Café Cacao Thé**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 11-16, jan. 1988. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260435991_Effects_and_after-effects_of_water_stress_on_chlorophyll_fluorescence_transients_in_Coffea_canephora_Pierre_and_Coffea_arabusta_Capo_and_Ake_Assi. Acesso em: 10 jan. 2024.

GIRI, A.; HECKATHORN, S.; MISHRA, S.; KRAUSE, C.. Heat Stress Decreases Levels of Nutrient-Uptake and -Assimilation Proteins in Tomato Roots. **Plants**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 6-21, 19 jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/plants6010006>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/6/1/6>. Acesso em: 20 jan. 2024.

HASSAN, M. U.; CHATTHA, M. U.; KHAN, I.; CHATTHA, M. B.; BARBANTI, L.; AAMER, M.; IQBAL, M. M.; NAWAZ, M.; MAHMOOD, At.; ALI, A. Heat stress in cultivated plants: nature, impact, mechanisms, and mitigation strategies: a review. **Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects Of Plant Biology**, [S.L.], v. 155, n. 2, p. 211-234, 4 mar. 2020. [Http://dx.doi.org/10.1080/11263504.2020.1727987](http://dx.doi.org/10.1080/11263504.2020.1727987). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/11263504.2020.1727987>. Acesso em: 07 jan. 2024.

HE, J.; TAN, C.; QIN, L. Root-Zone Priming Effects on Maximum Quantum Efficiency of PSII, Productivity, Root Morphology and Nutritional Quality of Two Aeroponically Grown Leafy Greens in a Tropical Greenhouse. **Plants**, [S.L.], v. 11, n. 13, p. 1864-

1698, 25 jun. 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11131684>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/13/1684>. Acesso em: 26 jan. 2024.

HUANG, L.; WANG, K.; BELL, R. W. Water supply influences boron uptake by transplanted oilseed rape (*Brassica napus* cv. Eureka) grown in low boron soil. **Boron In Soils And Plants**, [S.L.], v. 76, p. 157-160, 1997. [Http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-5564-9_30](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-5564-9_30). Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-5564-9_30. Acesso em: 25 jan. 2024.

HUMMEL, M.; HALLAHAN, B. F.; BRYCHKOVA, G.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; GUWELA, V.; CHATAIKA, B.; CURLEY, E.; MCKEOWN, P. C.; MORRISON, L.; TALSMAN, E. F. Reduction in nutritional quality and growing area suitability of common bean under climate change induced drought stress in Africa. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 16187-16198, 1 nov. 2018. [Http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-33952-4](http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-33952-4). Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-33952-4>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HUSSAIN, H. A.; MEN, S.; HUSSAIN, S.; CHEN, Y.; ALI, S.; ZHANG, S.; ZHANG, K.; LI, Y.; XU, Q.; LIAO, C. Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 3890-3902, 7 mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-40362-7>. Acesso em: 28 dez. 2023.

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. [S.L.], 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 01 set. 2023.

JAYAWARDENA, D. M.; HECKATHORN, S. A.; BISTA, D. R.; MISHRA, S.; BOLDT, J. K.; KRAUSE, C. R. Elevated CO₂ plus chronic warming reduce nitrogen uptake and levels or activities of nitrogen-uptake and -assimilatory proteins in tomato roots. **Physiologia Plantarum**, [S.L.], v. 159, n. 3, p. 354-365, 19 jan. 2017. [Http://dx.doi.org/10.1111/ppl.12532](http://dx.doi.org/10.1111/ppl.12532). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ppl.12532>. Acesso em: 30 jan. 2024.

JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. Analytical methods for use in plants analyses. Vol. 766. Los Angeles: University of California, 1959. p. 32-33.

JÚNIOR, J. G. S.; PIN, I. P.; FERREIRA, D. S.; CASTANHEIRA, D. T. Initial performance of coffee trees with diferente fertilization and irrigation management. **Coffee Science**, Lavras, MG, v.17, p. 171981-171991, 8 nov. 2022. <https://doi.org/10.25186/v17i.1981>. Disponível em: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1981>. Acesso em: 07 jan. 2024.

KILLI, D.; RASCHI, A.; BUSSOTTI, F. Lipid Peroxidation and Chlorophyll Fluorescence of Photosystem II Performance during Drought and Heat Stress is Associated with the Antioxidant Capacities of C3 Sunflower and C4 Maize Varieties. **International Journal Of Molecular Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 14, p. 4846-4867, 9

jul. 2020. [Http://dx.doi.org/10.3390/ijms21144846](http://dx.doi.org/10.3390/ijms21144846). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/14/4846>. Acesso em: 21 jan. 2024.

KLEUNEN, V. M.; FISCHER, M. Constraints on the evolution of adaptive phenotypic plasticity in plants. **New phytologist**, [S.L.], v. 166, n. 1, p. 49-60, 12 jan. 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01296.x>. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2004.01296.x>. Acesso em: 18 abr. 2024.

KLOCK, K. A.; GRAVES, W. R.; TABER, H. G. Growth and phosphorus, zinc, and manganese content of tomato, muskmelon, and honey locust at high root-zone temperatures¹. **Journal Of Plant Nutrition**, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 795-806, maio 1996. [Http://dx.doi.org/10.1080/01904169609365161](http://dx.doi.org/10.1080/01904169609365161). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904169609365161>. Acesso em: 26 jan. 2024.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 259-263, 10 jul. 2006. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Franz-Rubel/publication/51997463_World_Map_of_the_Koppen-Geiger_Climate_Classification_Updated/links/00b4952bd776de46d5000000/World-Map-of-the-Koeppen-Geiger-Climate-Classification-Updated.pdf. Acesso em: 10 dez. 2023.

LASKARI, M.; MENEXES, G.; KALFAS, I.; GATZOLIS, I.; DORDAS, C. Water Stress Effects on the Morphological, Physiological Characteristics of Maize (*Zea mays* L.), and on Environmental Cost. **Agronomy**, [S.L.], v. 12, n. 10, p. 2386-2403, 1 out. 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy12102386>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/12/10/2386>. Acesso em: 26 jan. 2024.

LÉON-BURGOS, A. F.; UNIGARRO, C.; BALAGUERA-LÓPEZ, H.E. Can prolonged conditions of water deficit alter photosynthetic performance and water relations of coffee plants in central-west Colombia? **South African Journal of Botany**, Colombia, v. 149, p. 366-375, jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629922003301>. Acesso em: 04 mai. 2023.

LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; LEITE, H. G. Precipitação efetiva e interceptação da chuva em um fragmento florestal com diferentes estágios de regeneração. **Revista Árvore**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 619-627, ago. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/rN7v3MkGSKXH8Wslt9kZxPM/>. Acesso em: 10 dez. 2023.

LIU, X.; LI, F.; ZHANG, Y.; YANG, Q. Effects of deficit irrigation on yield and nutritional quality of Arabica coffee (*Coffea arabica*) under different N rates in dry and hot region of southwest China. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 172, p. 1-8, jul. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.007>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377416301226>. Acesso em: 03 jan. 2024.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Diagnóstico do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARTINEZ, H. E. P.; BOHORQUEZ, C. A. A.; CECON, P. R. Efficiency of absorption, translocation, and use of nitrogen by water-stressed coffee. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 62923-62923, 17 out. 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/5yz4Sb38nwQ4X69qKBrBc8c/>. Acesso em: 20 jan. 2023.

MARTINEZ, H. E.P.; SOUZA, B. P.; CAIXETA, E. T.; CARVALHO, F. P.; CLEMENTE, J. M. Water deficit changes nitrate uptake and expression of some nitrogen related genes in coffee-plants (*Coffea arabica* L.). **Scientia Horticulturae**, Viçosa, MG, v. 267, p. 109254-109265, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109254>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423820300820>. Acesso em: 07 jan. 2024.

MCDOWELL, N. G.; SAPES, G.; PIVOVAROFF, A.; ADAMS, H. D.; ALLEN, C. D.; ANDEREGG, W. R. L.; AREND, M.; BRESHEARS, D. D.; BRODRIBB, T.; CHOAT, B. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 294-308, 29 mar. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43017-022-00272-1>. Acesso em: 15 jan. 2024.

MISHRA, S.; SPACCAROTELLA, K.; GIDO, J.; SAMANTA, I.; CHOWDHARY, G. Effects of Heat Stress on Plant-Nutrient Relations: an update on nutrient uptake, transport, and assimilation. **International Journal of Molecular Sciences**, [S.L.], v. 24, n. 21, p. 15670-15691, 27 out. 2023. [Http://dx.doi.org/10.3390/ijms242115670](http://dx.doi.org/10.3390/ijms242115670). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/21/15670>. Acesso em: 30 jan. 2024.

OIC – Organização Internacional do Café. Relatório sobre o mercado de café. Disponível em:

http://www.consorciopesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/dezembro/relatorio_oic_outubro_2021.pdf. Acesso em: 06 de outubro de 2022.

OSAKABE, Y.; ARINAGA, N.; UMEZAWA, T.; KATSURA, S.; NAGAMACHI, K.; TANAKA, H.; OHIRAKI, H.; YAMADA, K.; SEO, S.; ABO, M. Osmotic Stress Responses and Plant Growth Controlled by Potassium Transporters in Arabidopsis. **The Plant Cell**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 609-624, 1 fev. 2013. <http://dx.doi.org/10.1105/tpc.112.105700>. Disponível em: <https://academic.oup.com/plcell/article/25/2/609/6096520?login=false>. Acesso em: 06 maio 2024.

PELOSO, A. F.; TATAGIBA, S. D.; AMARAL, J. F. T. Limitações do crescimento vegetativo em cafeeiro arábica promovido pelo déficit hídrico. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, Lavras, v. 25, n. 2, p. 139-147, 8 maio 2017.

[Http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v25i2.755](http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v25i2.755). Disponível em:
<https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/679>. Acesso em: 18 set. 2023.

PELOSO, A. F.; TATAGIVA, S. D.; REIS, E. F.; PEZZOPANE, J. E. M.; AMARAL, J. F. Limitações fotossintéticas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 389-399, jul./set. 2017. Disponível em:
<http://tot.dti.ufv.br/handle/123456789/9130>. Acesso em: 19 set. 2023.

PEREIRA, L. L. **Desempenho Agrônômico e Qualidade Sensorial de Genótipos de Coffea arabica L. Cultivados em Altitude de Transição**. 2023. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Fitotecnia, Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023. Cap. 2. Disponível em:
<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/31913>. Acesso em: 03 fev. 2024.

PEUKE, A. D.; RENNENBERG, H. Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (*Fagus sylvatica* L.): phosphorus most affected by drought. **Trees**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 639-648, 6 maio 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00468-004-0335-x>. Acesso em: 20 jan. 2024.

PIZETTA, S.C; RODRIGUES, R. R.; RIBEIRO, W. R.; REIS, E. F.; COLODETTI, T. Análise do crescimento do cafeeiro arábica, em relação à fração de água transpirável do solo. **Coffe Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 46-54, jan./mar. 2016. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8172>. Acesso em: 19 set. 2023.

PRASAD, P. V. V.; STAGGENBORG, S. A.; RISTIC, Z. Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. *In*: AHUJA, L.R.; REDDY, V.R.; SASEENDRAN, S.A; YU, Q (org.). **Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes**. 1. ed. Manhattan: American Society Of Agronomy, Inc. Crop Science Society Of America, Inc. Soil Science Society Of America, Inc., 2008.

QI, J.; SUN, S.; YANG, L.; LI, M.; MA, F.; ZOU, Y. Potassium Uptake and Transport in Apple Roots Under Drought Stress. **Horticultural Plant Journal**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 10-16, jan. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hpj.2018.10.001>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468014118302504>. Acesso em: 06 maio 2024.

R Core Team. R: **A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 15 dez. 2023

RENGEL, Z.; CAKMAK, I.; WHITE, P. J. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Plants**. 4. ed. London: Academic Press, 2022.

RESENDE, L. S.; POZZA, E. A.; PEREIRA, R. C. M.; BOTREL, É. P.; ROTELI, K. C.; OLIVEIRA, J. M. Proposed diagrammatic scale to assess heat injury in coffee seedling canopy. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Lavras, v. 45, n. 1, p. 58614-58622, 20 mar. 2023. [Http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.58614](http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.58614). Disponível

em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/ZTvmJQGkGfRwfGj7q6XczXF/>. Acesso em: 05 maio 2023.

REZENDE, J. C.; PASQUAL, M.; CARVALHO, S. P.; PEREIRA, A. R.; VILLA, F. Influência do meio de cultura e concentração de agar no crescimento e desenvolvimento de plântulas de café oriundas da embriogênese somática direta. **Scientia Agraria**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 21-26, nov. 2008.

RIBAS, G. N. **Sistema automático para simulação de estresse térmico em culturas agrícolas**. 2023. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/fef3389c-76ee-4ed1-8840-a446f0067f91>. Acesso em: 20 jan. 2024.

RIBEIRO, A. F. F.; MATSUMOTO, S. N.; RAMOS, P. A.S.; SANTOS, J. L. D.; TEIXEIRA, E. C.; d'ARÊDE, L. O.; VIANA, A. E. S. Paclobutrazol e restrição hídrica no crescimento e desenvolvimento de plantas de café. **Coffee Science**, Lavras, n. 12, v. 4, p. 534-543, out./dez. 2017. Disponível em: <http://sbicafe.ufv.br/handle/123456789/9250>. Acesso em: 20 jan. 2024.

RODRIGUES, W. P.; SILVA, J. R.; FERREIRA, L. S.; MACHADO FILHO, J. A.; FIGUEIREDO, F. A. M. M. A.; FERRAZ, T. M.; BERNADO, W.P.; BEZERRA, L. B. S.; ABREU, D. P.; CESPOM, L. Stomatal and photochemical limitations of photosynthesis in coffee (*Coffea* spp.) plants subjected to elevated temperatures. **Crop And Pasture Science**, [S.L.], v. 69, n. 3, p. 317-325, maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1071/cp17044>. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/cp/cp17044>. Acesso em: 03 jan. 2024.

ROY, C.; CHATTOPADHYAY, T.; RANJAN, R. D.; HASAN, W.U; KUMAR, A.; DE, N. Association of leaf chlorophyll content with the stay-green trait and grain yield in wheat grown under heat stress conditions. **Czech Journal Of Genetics And Plant Breeding**, [S.L.], v. 57, n. 4, p. 140-148, 14 set. 2021. <http://dx.doi.org/10.17221/45/2021-cjgpb>. Disponível em: https://econpapers.repec.org/article/caajnlc/jg/v_3a57_3ay_3a2021_3ai_3a4_3aid_3a45-2021-cjgpb.htm. Acesso em: 21 jan. 2024.

SANTOS, T. B.; RIBAS, A.F.; SOUZA, S. G. H.; BUDZINSKI, I. G. F.; DOMINGUES, D. S. Physiological Responses to Drought, Salinity, and Heat Stress in Plants: a review. **Stresses**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 113-135, 16 fev. 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/stresses2010009>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-7140/2/1/9>. Acesso em: 04 maio 2023.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J.; OGAYA, R. Drought's impact on Ca, Fe, Mg, Mo and S concentration and accumulation patterns in the plants and soil of a Mediterranean evergreen *Quercus ilex* forest. **Biogeochemistry**, [S.L.], v. 87, n. 1, p. 49-69, 20 dez. 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-007-9167-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-007-9167-2>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SARKER, M. R.; CHOUDHURY, S.; ISLAM, N.; ZEB, T.; ZEB, B. S.; MAHMOOD, Q. The effects of climatic change mediated water stress on growth and yield of tomato. **Central Asian Journal Of Environmental Science And Technology Innovation**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 85-92, mar. 2020.

[Http://dx.doi.org/10.22034/CAJESTI.2020.02.03](http://dx.doi.org/10.22034/CAJESTI.2020.02.03). Disponível em: https://www.caspress.com/article_102380.html. Acesso em: 26 jan. 2024.

SEDIYAMA, G. C.; JUNIOR, J. C. F.; SANTOS, A. R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J. M. N.; COSTA, L. C.. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 501-509, 15 dez. 2001. Disponível em: <http://trigo.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/revista/cap14.pdf>. Acesso em: 29 dez. 2024.

SAKIYAMA, N.; MARTINEZ, H. E. P.; TOMAZ, M.; BORÉM, A. Café Arábica do Plantio à Colheita. Viçosa: Editora UFV, 316p. 2015.

SHANMUGAM, S., KJAER, K. H., OTTOSEN, C. O., ROSENQVIST, E., KUMARI SHARMA, D.; WOLLENWEBER, B. (2013). The Alleviating Effect of Elevated CO₂ on Heat Stress Susceptibility of Two Wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [S.L.], v. 199, n. 5, p. 340-350, fev. 2013.

<https://doi.org/10.1111/jac.12023>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jac.12023>. Acesso em: 21 jan. 2024.

SHIGAKI, F.; FREITAS, N.; BERTO, A.; CEDDIA, M. B.; ZONTA, E.; LIMA, E. Influência do estresse hídrico nos parâmetros de crescimento, acúmulo de N e produtividade de diferentes variedades de cana-de-açúcar em Miracema – RJ. **Revista Universitária Rural**, Seropédica, v. 24, n. 1, p. 63-71, jan./jun. 2004.

Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Ceddia/publication/255628095_INFLUENCIA_DO_ESTRESSE_HIDRICO_NOS_PARAMETROS_DE_CRESCIMENTO_ACUMULO_DE_N_E_PRODUTIVIDADE_DE_DIFERENTES_VARIEDADES_DE_CANA-DE-ACUCAR_EM_MIRACEMA_-_RJ/links/553e83010cf294deef7172cf/INFLUENCIA-DO-ESTRESSE-HIDRICO-NOS-PARAMETROS-DE-CRESCIMENTO-ACUMULO-DE-N-E-PRODUTIVIDADE-DE-DIFERENTES-VARIEDADES-DE-CANA-DE-ACUCAR-EM-MIRACEMA-RJ.pdf.

https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Ceddia/publication/255628095_INFLUENCIA_DO_ESTRESSE_HIDRICO_NOS_PARAMETROS_DE_CRESCIMENTO_ACUMULO_DE_N_E_PRODUTIVIDADE_DE_DIFERENTES_VARIEDADES_DE_CANA-DE-ACUCAR_EM_MIRACEMA_-_RJ/links/553e83010cf294deef7172cf/INFLUENCIA-DO-ESTRESSE-HIDRICO-NOS-PARAMETROS-DE-CRESCIMENTO-ACUMULO-DE-N-E-PRODUTIVIDADE-DE-DIFERENTES-VARIEDADES-DE-CANA-DE-ACUCAR-EM-MIRACEMA-RJ.pdf.

https://www.researchgate.net/profile/Marcos-Ceddia/publication/255628095_INFLUENCIA_DO_ESTRESSE_HIDRICO_NOS_PARAMETROS_DE_CRESCIMENTO_ACUMULO_DE_N_E_PRODUTIVIDADE_DE_DIFERENTES_VARIEDADES_DE_CANA-DE-ACUCAR_EM_MIRACEMA_-_RJ/links/553e83010cf294deef7172cf/INFLUENCIA-DO-ESTRESSE-HIDRICO-NOS-PARAMETROS-DE-CRESCIMENTO-ACUMULO-DE-N-E-PRODUTIVIDADE-DE-DIFERENTES-VARIEDADES-DE-CANA-DE-ACUCAR-EM-MIRACEMA-RJ.pdf.

Acesso em: 23 jan. 2024.

SILVA, A. C.; SILVA, A. M.; COELHO, G.; REZENDE, F. C.; SATO, F. A. Produtividade e potencial hídrico foliar do cafeeiro Catuaí, em função da época de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 1, p. 21-25, fev. 2008. [Http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662008000100003](http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662008000100003). Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Nnn7xynXdBYGWWZRx78CBdM/>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SILVA, E. C., NOGUEIRA, R. J. M. C., SILVA, M. A.; ALBUQUERQUE, M. B. (2011). Drought stress and plant nutrition. **Plant stress**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 32-41, 21 dec. 2011. Disponível em:

[http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOonline/images/2011/PS_5SI1/PS_5\(SI1\)32-41o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOonline/images/2011/PS_5SI1/PS_5(SI1)32-41o.pdf). Acesso em: 24 jan. 2024.

SINGH, T.N.; PALEG, I.G.; ASPINALL, D. Stress Metabolism I. Nitrogen Metabolism and Growth in the Barley Plant During Water Stress. **Australian Journal Of Biological Sciences**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 45-56, 1973.

[Http://dx.doi.org/10.1071/bi9730045](http://dx.doi.org/10.1071/bi9730045). Disponível em:

<https://www.publish.csiro.au/BI/BI9730045>. Acesso em: 23 jan. 2024.

SÖNDAHL, M.R.I.; MÔNACO, L.C.; CARVALHO, A.; FAZUOLI, L.C. Efeito de dias longos em progênies de café, tratadas com benziladenina e giberelina. **Ciência e Cultura**, v. 24, p.336, 1972.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal**. 1. ed. Artmed Editora, 2021.

TANGUILIG, V. C.; YAMBAO, E. B.; O'TOOLE, J. C.; DATTA, S. K. de. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. **Plant And Soil**, [S.L.], v. 103, n. 2, p. 155-168, set. 1987.

[Http://dx.doi.org/10.1007/bf02370385](http://dx.doi.org/10.1007/bf02370385). Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02370385>. Acesso em: 23 jan. 2024.

TEIXEIRA, A. L.; SOUZA, F. F.; PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, A. C. B.; ROCHA, R. B. Selection of arabica coffee progenies tolerant to heat stress. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 45, n. 7, p. 1228-1234, jul. 2015. [Http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130317](http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130317).

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cr/a/3GTbG4nnWRCmPjQnMW5bgnq/?lang=en>. Acesso em: 29 jan. 2024.

TOUNEKTI, T.; MAHDHI, M.; AL-TURKI, T.A.; KHEMIRA, H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. **South African Journal Of Botany**, [S.L.], v. 117, p. 17-25, jul. 2018. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2018.04.022](http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2018.04.022). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629918300255>. Acesso em: 20 jan. 2024.

TOVAR, J. C.; BERRY, J. C.; QUILLATUPA, C.; CASTILLO, S. E.; ACOSTA-GAMBOA, L.; FAHLGREN, N.; GEHAN, M. A. Heat stress changes mineral nutrient concentrations in *Chenopodium quinoa* seed. **Plant Direct**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 384-397, fev. 2022. [Http://dx.doi.org/10.1002/pld3.384](http://dx.doi.org/10.1002/pld3.384). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pld3.384>. Acesso em: 26 jan. 2024.

WANG, M., ZHENG, Q., SHEN, Q., GUO, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. **International journal of molecular sciences**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 7370-7390, abr. 2013. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/14/4/7370>. Acesso em: 30 jan. 2024.

WENT, F. W. The experimental control of plant growth. **The experimental control of plant growth**, [S.L.], v. 17, 7 dec. 1957. Disponível em:

<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19581602441>. Acesso em: 21 jan. 2024.

WESTHUIZEN, M. V. D.; OOSTERHUIS, D.; BERNER, J.; BOOGAERS, N. Chlorophyllafluorescence as an indicator of heat stress in cotton (*Gossypium hirsutum*L.). **South African Journal Of Plant And Soil**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 116-119, 14 mar. 2020. [Http://dx.doi.org/10.1080/02571862.2019.1665721](http://dx.doi.org/10.1080/02571862.2019.1665721). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02571862.2019.1665721>. Acesso em: 21 jan. 2024.

XU, Y.; SUN, X.; ZHANG, Q.; LI, X.; YAN, Z. Iron plaque formation and heavy metal uptake in *Spartina alterniflora* at different tidal levels and waterlogging conditions. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, [S.L.], v. 153, n. 1, p. 91-100, mai. 2018. [Http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.008). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651318300812>. Acesso em: 03 fev. 2024.

YAMANE, K.; NISHIKAWA, M.; HIROOKA, Y.; NARITA, Y.; KOBAYASHI, T.; KAKIUCHI, M.; IWAI, K.; IJIMA, M. Temperature tolerance threshold and mechanism of oxidative damage in the leaf of *Coffea arabica* 'Typica' under heat stress. **Plant Production Science**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 337-349, 19 abr. 2022. [Http://dx.doi.org/10.1080/1343943x.2022.2064309](http://dx.doi.org/10.1080/1343943x.2022.2064309). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1343943X.2022.2064309>. Acesso em: 30 jan. 2024.

CONCLUSÕES GERAIS

De modo geral, a cultivar MGS Paraíso 2, para várias características, sejam elas de crescimento ou nutricionais, se diferencia das cultivares Catucaiam 24137 e Catucaí Amarelo 2SL, muitas vezes, com melhor desempenho nas condições sem estresses abióticos. Particularmente, nas condições com estresse hídrico e/ou térmico, as três cultivares apresentam comportamento similar, com redução do crescimento e da concentração de macro e micronutrientes.

Destaca-se, nesse estudo, o efeito negativo da redução da disponibilidade hídrica na morfologia e crescimento do cafeeiro arábica, e o efeito complexo dos estresses hídrico e térmico no estado nutricional das plantas.

Desta forma, a partir dos resultados encontrados e considerando os cenários futuros de aquecimento global, novos estudos serão necessários sobre cultivares mais tolerantes aos estresses térmicos e hídricos, bem como adequar a nutrição das plantas a essas condições, com intuito de se obter cafés de boa qualidade em lavouras produtivas.