



**NAGLA MARIA SAMPAIO DE MATOS**

**RESPOSTAS ANATOMOFISIOLÓGICAS DE CLONES DE  
*Coffea canephora* SUBMETIDOS AO MANEJO DE  
IRRIGAÇÃO DO CERRADO DO PLANALTO CENTRAL**

**LAVRAS - MG  
2020**

**NAGLA MARIA SAMPAIO DE MATOS**

**RESPOSTAS ANATOMOFISIOLÓGICAS DE CLONES DE *Coffea canephora*  
SUBMETIDOS AO MANEJO DE IRRIGAÇÃO DO CERRADO DO PLANALTO  
CENTRAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Dr. César Elias Botelho  
Orientador

Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho  
Coorientadora

**LAVRAS - MG  
2020**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

De Matos, Nagla Maria Sampaio.

Respostas anatomofisiológicas de clone de *Coffea  
canephora* submetidos ao manejo de irrigação do Cerrado do  
Planalto Central / Nagla Maria Sampaio De Matos. - 2020.  
78 p. : il.

Orientador(a): César Elias Botelho.

Coorientador(a): Milene Alves de Figueiredo Carvalho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. *Coffea canephora*. 2. Anatomia. 3. Fisiologia. I. Botelho,  
César Elias. II. Carvalho, Milene Alves de Figueiredo. III. Título.

**NAGLA MARIA SAMPAIO DE MATOS**

**RESPOSTAS ANATOMOFISIOLÓGICAS DE CLONES DE *Coffea canephora*  
SUBMETIDOS ÀS CONDIÇÕES DE MANEJO DO CERRADO DO PLANALTO  
CENTRAL**

**ANATOMOPHYSIOLOGICAL RESPONSES OF *Coffea canephora* CLONES  
SUBMITTED TO THE MANAGEMENT CONDITIONS OF THE CENTRAL  
PLANALTO CERRADO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 22 de dezembro de 2020.

Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho      EMBRAPA

Dr. Vanessa Cristina Stein                              UFSJ

Dr. Antônio Nazareno Guimarães Mendes      UFLA

Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori              UFLA

Dr. César Elias Botelho  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2020**

*A Deus, por toda a trajetória vivida e, principalmente, à luz que ilumina os meus dias,  
meu filho Joaquim.*

*Aos meus pais, Lena e Luiz, por sempre estarem presentes, e acima de tudo, serem  
quem são e nunca desistirem de fazer sempre o melhor por mim e por toda a família.*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me mostrar o melhor caminho a ser seguido e, principalmente, me guiando e iluminando em todas as decisões e passos dados nesta jornada.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Agricultura, pela oportunidade de realizar o doutorado.

À CAPES e ao CNPq, pelas bolsas de doutorado (o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Ao meu orientador César Elias Botelho, pelo apoio na reta final do doutorado e ao professor Dr. Antônio Nazareno Guimarães Mendes, por todo o ensinamento, me mostrando que além de profissional excelente, é um ser humano iluminado, sendo meu exemplo a ser seguido para a vida.

À minha coorientadora, Dra. Milene Alves de Figueiredo Carvalho, pelas orientações, ensinamentos, conselhos, paciência e, principalmente, pela amizade durante todo o tempo de convivência. Agradeço sempre a Deus por ter tido a oportunidade de tê-la conhecido.

À Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (Embrapa Café e Embrapa Cerrados), pelo apoio, disponibilidade de infraestrutura e materiais genéticos para a realização deste trabalho.

Ao Consórcio Pesquisa Café pelo financiamento do projeto e aos pesquisadores da EMBRAPA, Gustavo Costa Rodrigues e Adriano Delly Veiga, por sempre nos acompanhar durante a realização da pesquisa e, principalmente, por nos auxiliarem com o seu conhecimento e profissionalismo.

Aos colegas do Laboratório de Anatomia e Fisiologia do Café, por todo o aprendizado durante esse tempo e pelas amizades adquiridas. Às secretárias Marli, da Pós-graduação, e Débora, da InovaCafé, pelo auxílio e apoio sempre.

Ao meu namorado Paulo, por todo apoio e incentivo. Aos meus familiares, em especial aos meus pais e irmãs, que sempre me apoiaram e me incentivaram a seguir o caminho que eu escolhi.

Aos colegas do Departamento de Agricultura e da InovaCafé, pela convivência.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Obrigada por fazerem parte desse momento tão especial!

## RESUMO

A região do Cerrado brasileiro apresenta grande potencial produtivo para a cultura do café, participando de aproximadamente 40% do âmbito nacional, devido ao fato de apresentar um clima favorável ao cultivo, topografia, uso de cultivares e mudas clonais mais adaptados, sistema de irrigação, dentre outros. Além disso, aproveitando o sistema irrigado e o clima bem definido, pode ser realizada a suspensão da irrigação no período de inverno, visando a sincronização de florada, resultando em maior produção de frutos cerejas. Objetivou-se com o presente estudo avaliar o comportamento de clones de *Coffea canephora* submetidos ao manejo de irrigação do Cerrado do Planalto Central, através de avaliações de características anatômicas, fisiológicas e bioquímicas, para a seleção de plantas que sejam mais adaptadas ao ambiente de cultivo. As avaliações foram realizadas em seis clones da espécie *Coffea canephora*, sendo quatro da variedade Robusta e duas da variedade Conilon, dos quais um é tolerante a seca (clone 14) e o outro sensível (clone 22). Foram realizadas avaliações em quatro períodos, nos anos de 2016 e 2017, compreendendo antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses após o retorno da irrigação (3mARI). Foram avaliadas características anatômicas foliares como densidade e relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos, diâmetro, número e frequência dos vasos do xilema, área total do xilema, área total do floema, índice de vulnerabilidade e condutância hidráulica relativa. As características fisiológicas analisadas foram taxa fotossintética líquida, condutância estomática, taxa transpiratória, eficiência do uso da água, eficiência de carboxilação, potencial hídrico foliar, eficiência quântica potencial do fotossistema II, índices de clorofila A, B e total e conteúdo relativo de água. Foi avaliado ainda o sistema antioxidante enzimático através da dismutase do superóxido, catalase e peroxidase do ascorbato e não enzimático com a quantificação do ascorbato. Para avaliação do estresse ocasionado foram quantificados peróxido de hidrogênio, peroxidação lipídica e extravasamento de eletrólitos. Os clones 14, 8 e 125 apresentaram comportamentos semelhantes e maior desenvolvimento de características para sobreviver ao ambiente de cultivo, como alteração nas trocas gasosas, potencial hídrico relativamente alto sob deficiência hídrica, eficiência do uso da água, desenvolvimento e alteração nos vasos xilemáticos, responsáveis pelo transporte de água. Já o clone 30 apresentou maior sensibilidade, semelhante ao clone 22, com maior dano oxidativo quando expostos ao déficit hídrico. Já o clone 114 apresentou um mecanismo de sobrevivência intermediário. Conclui-se que os clones apresentaram diferentes estratégias de adaptação e sobrevivência frente ao déficit hídrico imposto.

Palavras-chave: Café canéfora. Suspensão da irrigação. Sincronização de florada. Sistema antioxidante. Estresse oxidativo. Anatomia foliar. Fisiologia.

## ABSTRACT

The Brazilian Cerrado region has great productive potential for coffee culture, participating in approximately 40% of the national scope. This fact is due to the fact that it has a favorable climate for cultivation, topography, use of cultivars and more adapted clonal seedlings, irrigation system, among others. In addition, taking advantage of the irrigated system and the well-defined climate, suspension of irrigation can be carried out in the winter period, aiming at flowering synchronization, resulting in greater production of cherry fruits. The objective of the present study was to evaluate the behavior of *Coffea canephora* clones submitted to irrigation management in the Cerrado do Planalto Central through evaluations of anatomical, physiological and biochemical characteristics, for the selection of plants that are more adapted to the growing environment. The evaluations were carried out in six clones of the species *Coffea canephora*, four of the Robusta variety and two of the Conilon variety, of which one is drought tolerant (clone 14) and the other sensitive (clone 22). Evaluations were carried out in four periods, in the years 2016 and 2017, comprising before (APSI) and at the end (FPSI) of the irrigation suspension period, two days (2dARI) and three months after the return of irrigation (3mARI). Leaf anatomical characteristics such as density and ratio of polar and equatorial diameter of stomata, diameter, number and frequency of xylem vessels, total xylem area, total phloem area, vulnerability index and relative hydraulic conductance were evaluated. The physiological characteristics analyzed were liquid photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiratory rate, water use efficiency, carboxylation efficiency, leaf water potential, potential quantum efficiency of photosystem II, chlorophyll A, B and total indices and relative water content. The enzymatic antioxidant system was also evaluated using superoxide dismutase, catalase and ascorbate peroxidase and non-enzymatic with ascorbate quantification. To assess the stress caused, hydrogen peroxide, lipid peroxidation and electrolyte leakage were quantified. Clones 14, 8 and 125 showed similar behaviors and greater development of characteristics to survive the farming environment, such as changes in gas exchange, relatively high water potential under water deficiency, efficiency in water use, development and alteration in xylemic vessels, responsible water transport. Clone 30, on the other hand, showed greater sensitivity, similar to clone 22, with greater oxidative damage when exposed to water deficit. Clone 114, on the other hand, had an intermediate survival mechanism. It is concluded that the clones presented different adaptation and survival strategies in the face of the imposed water deficit.

**Keywords:** Canephore coffee. Irrigation suspension. Flowering synchronization. Antioxidant system. Oxidative stress. Leaf anatomy. Physiology.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Representação gráfica das variáveis climatológicas registradas nos dois anos de avaliação 2016 (A) e 2017 (B). .....29
- Figura 2 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, antes do período de suspensão da irrigação. (A) Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones estudados, baseada nas características avaliadas no ano de 2016. ....35
- Figura 3 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* função estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, no final do período de suspensão da irrigação (FPSI – A e B) e dois dias após o retorno da irrigação (2dARI – C e D). (A e C) Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B e D) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas no ano de 2016. ....38
- Figura 4 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, três meses após o retorno da irrigação. Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2016. ....42
- Figura 5- Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, antes do período de suspensão da irrigação. Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2017. ....44
- Figura 6 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, no final do período de suspensão da irrigação (FPSI – A e B) e dois dias após o retorno da irrigação (2dARI – C e D). (A e C) Os coeficientes de correlação para as características foram representadas pelo vetor.

	(B e D) A segregação dos seis clones de <i>Coffea canephora</i> estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2017.....	46
Figura 7 -	Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de <i>Coffea canephora</i> estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, três meses após o retorno da irrigação. (A) Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones de <i>Coffea canephora</i> estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2017.....	50
Figura 8 -	Atividade da superóxido dismutase (SOD – U SOD mg-1 MF), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de <i>Coffea canephora</i> . Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.....	52
Figura 9 -	Atividade da ascorbato peroxidase (APX - $\mu\text{mol AsA min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de <i>Coffea canephora</i> . Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições. ....	53
Figura 10 -	Atividade da catalase (CAT - $\mu\text{mol H}_2\text{O min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de <i>Coffea canephora</i> . Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.....	54
Figura 11 -	Níveis de ascorbato (AsA - $\mu\text{mol AsA mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de <i>Coffea canephora</i> . Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.....	56
Figura 12 -	Níveis de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ - $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de <i>Coffea canephora</i> . Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.....	57

- Figura 13 - Níveis de malondialdeído (MDA -  $\mu\text{mol MDA mg}^{-1}\text{MF}$  ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.....58
- Figura 14 - Extravasamento de eletrólitos (EE- %), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.....59

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Clones de *Coffea canephora* selecionados no Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Cerrados, Planaltina – DF.....27
- Tabela 2 - Valores médios de eficiência do uso da água (WUE- A/E), frequência de vasos do xilema (fvx – VX/ mm<sup>2</sup>), relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (dpde), densidade estomática (den - NE/ mm<sup>2</sup>), área do xilema (ax - μm<sup>2</sup>), índice de vulnerabilidade (iv), número de vasos do xilema (nvx), diâmetro de vasos do xilema (dvx - μm) e condutividade hidráulica relativa (chr- μm<sup>4</sup> 10<sup>6</sup>) de diferentes clones de *Coffea canephora* antes do período de suspensão da irrigação (APSI). 2016. ....36
- Tabela 3 - Valores médios de taxa fotossintética (A - μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), taxa transpiratória (E - mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (gs - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), eficiência do uso da água (WUE- A/E), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), conteúdo relativo de água (cra -%), eficiência de carboxilação (CUE), potencial hídrico antemanhã (MPa), densidade estomática (den – NE/mm<sup>2</sup>), área do xilema (ax - μm<sup>2</sup>), frequência de vasos do xilema (fvx) e número de vasos de xilema (nvx) de diferentes clones de *Coffea canephora* no final do período de suspensão da irrigação (FPSI). 2016.....39
- Tabela 4 - Valores médios de eficiência do uso da água (WUE- A/E), eficiência de carboxilação (CUE – A-Ci), taxa transpiratória (E - mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (gs - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm), potencial hídrico antemanhã (MPa), área do xilema (ax - μm<sup>2</sup>), área do floema (af - μm<sup>2</sup>), número de vasos de xilema (nvx), relação diâmetro polar e equatorial estomática (dpde), densidade estomática (den – mm<sup>2</sup>) e condutividade hidráulica relativa(chr - μm<sup>4</sup> 10<sup>6</sup>) de diferentes clones de *Coffea canephora* dois dias após o retorno da irrigação (2dARI). 2016. ....41
- Tabela 5 - Valores médios de taxa transpiratória (E - mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (gs - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), número de vasos de xilema (nvx), diâmetro de vasos do

	xilema (dvx- $\mu\text{m}$ ), frequência de vasos do xilema (fvx), condutividade hidráulica relativa (chr - $\mu\text{m}^4 10^6$ ), densidade estomática (den - $\text{NE}/\text{mm}^2$ ) e área total do floema (af - $\mu\text{m}^2$ ) de diferentes clones de <i>Coffea canephora</i> três meses após o retorno da irrigação (3mARI). 2016.....	43
Tabela 6 -	Valores médios de taxa transpiratória (E - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), eficiência do uso da água (WUE- A/E), índice de clorofilas a, b e total (clA, clB e clT - ICF), área do xilema (ax - $\mu\text{m}^2$ ), número de vasos de xilema (nvx), frequência dos vasos do xilema (fvx), diâmetro dos vasos do xilema (dvx - $\mu\text{m}$ ), área do floema (af - $\mu\text{m}^2$ ), índice de vulnerabilidade (iv) e condutividade hidráulica relativa (chr - $\mu\text{m}^4 10^6$ ) de diferentes clones de <i>Coffea canephora</i> antes do período de suspensão da irrigação (APSI). 2017. ....	45
Tabela 7 -	Valores médios de taxa fotossintética líquida (A - $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), taxa transpiratória (E - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e condutância estomática (gs - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), relação concentração intercelular de $\text{CO}_2$ no mesófilo/concentração de $\text{CO}_2$ externa atual (CiCa), conteúdo relativo de água (cra - %), potencial hídrico antemanhã foliar (MPa), eficiência quântica potencial do PSII (FvFm), índice de clorofilas a, b e total (clA, clB, clT - ICF), densidade estomática ( $\text{NE}/\text{mm}^2$ ), área do xilema (ax - $\mu\text{m}^2$ ), diâmetro de vasos de xilema (dvx - $\mu\text{m}$ ), índice de vulnerabilidade (iv) e condutividade hidráulica relativa (chr - $\mu\text{m}^4 10^6$ ) de diferentes clones de <i>Coffea canephora</i> no final do período de suspensão da irrigação (FPSI). 2017. ....	48
Tabela 8 -	Valores médios de fotossíntese (A - $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), eficiência do uso da água (WUE - A/E) eficiência de carboxilação (CUE - A/Ci), conteúdo relativo de água (cra - %), potencial hídrico antemanhã (MPa), eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm), densidade estomática ( $\text{mm}^2$ ), área do floema (af - $\mu\text{m}^2$ ), área do xilema (ax - $\mu\text{m}^2$ ), frequência de vasos de xilema (fvx), diâmetro de vasos de xilema (dvx) e índice de vulnerabilidade (iv) de diferentes clones de <i>Coffea canephora</i> dois dias após o retorno da irrigação (2dARI). 2017. ....	49
Tabela 9 -	Valores médios de transpiração (E - $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), relação concentração intercelular de $\text{CO}_2$ no mesófilo/concentração de $\text{CO}_2$ externa atual (CiCa), eficiência do uso da água (CUE - A/E), índice das clorofilas a e total (clA, clT - ICF), área do floema (af - $\mu\text{m}^2$ ), área do xilema (ax - $\mu\text{m}^2$ ), número de vasos de xilema (nvx), diâmetro	

dos vasos do xilema (dvx -  $\mu\text{m}$ ), frequência de vasos do xilema (fvx) e índice de vulnerabilidade (iv) de diferentes clones de *Coffea canephora* três meses após o retorno da irrigação (3mARI). 2017.....51

## LISTA DE ABREVIATURAS

2dARI	2 dias após o retorno da irrigação
3mARI	3 meses após o retorno da irrigação
A	Taxa fotossintética líquida
AFL	Área total da região do floema
APSI	Antes do período de suspensão da irrigação
APX	Peroxidase do ascorbato
AX	Área total da região do xilema
CAT	Catalase
CHR	Condutividade hidráulica relativa
Ci	Carbono interno
CIA	Índice de clorofila A
CIB	Índice de clorofila B
CIT	Índice de clorofila Total
CRA	Conteúdo relativo de água
CUE	Eficiência de carboxilação
DE	Diâmetro equatorial do estômato
DEN	Densidade estomática
DP	Diâmetro polar do estômato
DPDE	Relação entre o diâmetro polar e o diâmetro equatorial dos estômatos
DVX	Diâmetro dos vasos do xilema
E	Taxa transpiratória
EE	Extravasamento de eletrólitos
FPSI	Final do período de suspensão da irrigação
FvFm	Eficiência quântica do fotossistema II (FSII)
FVX	Frequência de vasos do xilema
gs	Condutância estomática
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrogênio
IV	Índice de vulnerabilidade
MDA	Malondialdeído
MPa	Potencial hídrico foliar antemanhã
NE	Número de estômatos

NVX	Número de vasos do xilema
SOD	Dismutase do superóxido
VX	Vasos do xilema
WUE	Eficiência instantânea do uso da água



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Cenário e produção de café no cerrado.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Fisiologia e anatomia em sistema de manejo da irrigação do cerrado .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Estresse oxidativo e mecanismo de defesa antioxidante em plantas sob sistema de irrigação .....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Características avaliadas .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.1</b>	<b>Características anatômicas.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Análises fisiológicas .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Características bioquímicas.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.3.1</b>	<b>Metabolismo antioxidante .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.3.2</b>	<b>Quantificação do Ascorbato .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.3.3</b>	<b>Quantificação de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e peroxidação lipídica.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Análise estatística .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Características anatômicas e fisiológicas .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Características Bioquímicas .....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura do café possui grande importância social e econômica para o Brasil, visto que o país é o maior produtor, com aproximadamente 63 milhões de sacas beneficiadas, exportador e recentemente passou a ser o terceiro consumidor mundial (USDA, 2020) e as espécies *Coffea arabica* e *Coffea canepora* são as mais cultivadas no país (ICO, 2019). Apesar do cultivo de café ser bastante difundido nas diversas regiões, os estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná, Goiás e Mato Grosso, são os principais produtores (CONAB, 2020).

Ainda de acordo com a CONAB (2020), a Região do Cerrado se destacou com os maiores incrementos na produtividade de café. A grande importância desta região para a maior produção de café em relação às outras se dá por suas condições climáticas favoráveis, adoção de práticas mais sofisticadas como, uso de sistema de irrigação, cultivares e clones mais responsivos e superiores, adensamento de plantas, mecanização e podendo utilizar técnicas de manejo irrigado visando maior uniformização de florada (CONAB, 2020; FERNANDES *et al.*, 2012; FERNANDES *et al.*, 2020).

A utilização de manejo irrigado nessa região tem sido adotada para minimizar as perdas em produtividade causadas por déficit hídrico. Entretanto, Guerra, Rocha e Rodrigues (2005) propuseram a utilização da interrupção da irrigação nos meses de junho a agosto (estação seca), visando uma maior uniformização de florada e, conseqüentemente, maior número de frutos cerejas, resultando em maior qualidade de produto final.

O estresse hídrico é o principal fator limitante para o crescimento e produção das culturas em todo o mundo (ALTER *et al.*, 2015; CHESEREK; GICHIMU, 2012), afetando negativamente o funcionamento normal do metabolismo das plantas e diminuindo seu potencial hídrico (LISAR *et al.*, 2012), podendo assim, ser prejudicial para a cultura do café (BUNN *et al.*, 2015; CRAPARO *et al.*, 2015; MAGRACH; GHAZOUL, 2015).

Para sobreviver às adversidades ambientais, como déficit hídrico e altas temperaturas do ambiente, as plantas apresentam alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, como resposta para melhor se adaptar ao ambiente de cultivo (DAMATTA *et al.*, 2018; ZOKAEE-KHOSROSHAHI *et al.*, 2014). Características anatômicas aliadas às fisiológicas podem ser potenciais na seleção de plantas visando melhoramento genético do cafeeiro (BATISTA *et al.*, 2010; CASTANHEIRA *et al.*, 2016; GRISI *et al.*, 2008), fazendo-se necessária a criação de novas cultivares mais adaptadas e tolerantes a diversas condições ambientais (VAN DER VOSSSEN *et al.*, 2015 ).

O déficit hídrico também causa uma superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs), superóxidos, peróxido de hidrogênio, oxigênio singlete e radicais (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; FOYER; NOCTOR, 2005), essa produção desequilibrada, é conhecida como estresse oxidativo, e pode ocasionar danos celulares e até mesmo acarretar a morte da planta (BARBOSA *et al.*, 2014).

Para a eliminação ou reparação das EROs, as plantas acionam um sistema de defesa antioxidante a partir da atividade das enzimas dismutase do superóxido, peroxidase do ascorbato, catalase, dentre outras (HUANG *et al.*, 2013; SHARMA *et al.*, 2012), bem como de metabólitos não enzimáticos, como a glutatona e o ascorbato, que atuam de forma conjunta, reduzindo assim o dano oxidativo (BARBOSA *et al.*, 2014; GRATÃO *et al.*, 2005).

Objetivou-se com o presente estudo, avaliar o comportamento de clones de *Coffea canephora* submetidos ao manejo de irrigação do Cerrado do Planalto Central através de avaliações de características anatômicas, fisiológicas e bioquímicas, para a seleção de plantas que sejam mais adaptadas ao ambiente de cultivo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cenário e produção de café no Cerrado

O Brasil é o maior produtor, exportador e terceiro consumidor mundial de café (USDA, 2020), o que torna a sua produção uma atividade de grande importância social e econômica para o país, e as espécies mais cultivadas são *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner (ICO, 2019). Para o ano de 2020, a produção de café indicada foi de aproximadamente 63 milhões de sacas beneficiadas, *C. arabica* e *C. canephora* (CONAB, 2020). A produção de café é bastante difundida nas diversas regiões do país, onde os estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná, Goiás e Mato Grosso são os principais produtores (CONAB, 2020).

A região do Cerrado brasileiro detém os maiores incrementos na produtividade de café, estando acima da média nacional, onde o estado de Minas Gerais produziu 34, 65 milhões de sacas de arábica, Bahia 3,99 milhões de sacas e Goiás 247,8 mil sacas (CONAB, 2020). A produção de café também ocorre em outros estados, entretanto, é menos expressiva comparando-se aos estados citados (FERNANDES *et al.*, 2012).

Os estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Tocantins, Bahia, Piauí, Maranhão, São Paulo e Distrito Federal compõem a região do Cerrado, contudo, há predominância no Planalto Central (Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Tocantins), que domina cerca de 23% do território nacional (MMA, 2007).

A grande importância desta região para a maior produção de café em relação às outras se dá por suas condições climáticas favoráveis, principalmente na época de colheita (maio a setembro), em que há predominância de menor umidade relativa tornando o clima mais seco, evitando assim perdas na qualidade de bebida causadas por fermentação (FERNANDES *et al.*, 2012). Aliado a isto, a adoção de práticas mais sofisticadas como, sistema de irrigação, cultivares e clones mais responsivos e superiores, adensamento de plantas, mecanização e podendo utilizar técnicas de manejo irrigado visando maior uniformização de florada (CONAB, 2020; FERNANDES *et al.*, 2012; FERNANDES *et al.*, 2020).

O principal fator limitante no crescimento e produção das culturas em todo o mundo é o déficit hídrico (ALTER *et al.*, 2015), resultado no desequilíbrio entre a disponibilidade de água no solo, a transpiração e às exigências das mesmas (CEMADEN, 2019; IPMA, 2018). Diante disso, a utilização do sistema de irrigação na Região do Cerrado é fundamental para

melhor desempenho do café, diminuindo os impactos causados pelas condições climáticas locais (FERNANDES *et al.*, 2012).

A espécie *C. arabica* detém a maior parte da produção da região do cerrado (FERNANDES *et al.*, 2020), predominante no estado de Minas Gerais com 6 milhões de sacas (CONAB, 2020), e é importante destacar que a espécie *C. canephora* é mais tolerante a altas temperaturas e deficiência hídrica em relação ao *C. arábica*, mesmo apresentando menor produtividade (DAMATTA *et al.*, 2018).

Dentro da espécie *C. canephora* existem dois grupos predominantes geograficamente no continente africano, o Congolês e o Guineano. A variedade Robusta (que também recebe o nome comum da espécie) é a mais utilizada mundialmente, pertencente ao grupo Congolês (DAMATTA; RAMALHO, 2006; CARVALHO, 2008), já no grupo Guineano, destaca-se a variedade Conilon (que também é conhecida por Kouillou), caracterizada pelo porte menor em relação à variedade Robusta (MARCOLAN, 2015).

A variedade Conilon, é a mais cultivada no Brasil (DAMATTA; RAMALHO, 2006), sendo que a mesma apresenta melhor adaptação a altas temperaturas e menor índice pluviométrico comparando-se com a variedade robusta (MONTAGNON; LEROY, 1993; MONTAGNON *et al.*, 2000; MARCOLAN, 2015).

A água é de suma importância para o crescimento e desenvolvimento nas diferentes fases fenológicas da cultura do café, entretanto, a utilização do estresse hídrico em determinada fase pode proporcionar e condicionar uma florada uniforme e mais abundante, visando assim, maior número de frutos (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

Estudo realizado por Guerra *et al.* (2005) propôs a utilização da interrupção da irrigação nos meses de junho a agosto (estação seca), visando uma maior uniformização de florada e, conseqüentemente, maior número de frutos cerejas, resultando no melhor aproveitamento do manejo irrigado aliado ao ambiente mais definido predominante da Região do Cerrado. Ainda de acordo com os autores, o período de suspensão hídrica não deve ultrapassar o mês de agosto, período de ocorre a primeira florada nesta região, o que resultaria em abortamento floral devido a altas temperaturas aliadas a baixa umidade relativa do ar.

A utilização de suspensão de irrigação de aproximadamente 60 a 70 dias beneficiou a uniformização da florada em cafeeiros produzidos no estado de São Paulo e na região do Cerrado (GUERRA; ROCHA; RODRIGUES, 2005; SILVA *et al.*, 2009).

Miranda *et al.* (2020), promoveram estudo com cultivares de café na região do cerrado mineiro, utilizando interrupção da irrigação, concluíram que, embora a floração não tenha sido um evento único e concentrado, a suspensão hídrica foi benéfica, resultando em

amadurecimento de frutos mais uniformemente nas cultivares de café arábica utilizadas. Resultado semelhante foi encontrado por Souza *et al.* (2014), quando se analisou a interrupção da irrigação em clone da espécie *Coffea canephora*.

Para sobreviver a diferentes condições ambientais, as plantas apresentam modificações fisiológicas, morfológicas e bioquímicas (DAMATTA *et al.*, 2018), o que proporciona maior capacidade de recuperação do cafeeiro em períodos de estresse hídrico (MARTINS *et al.*, 2019).

## 2.2 Fisiologia e anatomia em sistema de manejo da irrigação do Cerrado

A utilização de sistema de irrigação na Região do Cerrado visa diminuir os impactos causados pelas altas temperaturas do ambiente e menor índice pluviométrico (FERNADES *et al.*, 2012), pois um período prolongado de estresse hídrico afeta diretamente o crescimento das plantas e, conseqüentemente, a produtividade (ERDIANSYAH *et al.*, 2019; MIRANDA *et al.*, 2020).

O estresse hídrico é caracterizado como um fator externo, pela falta ou excesso de água, ocasionando influência desvantajosa nas plantas, em que a falta ou déficit é quando o conteúdo de água existente no tecido ou célula de uma planta está em quantidade inferior, quando a mesma está hidratada (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Quando as plantas passam por condições ambientais adversas, como respostas apresentam modificações internas, seja fisiológicas, morfológicas (ZOKAEE-KHOSROSHAHI *et al.*, 2014), visto isso, essas modificações são de grande importância na distinção e seleção de plantas quando as mesmas respondem a uma deficiência hídrica e aumento de temperatura no ambiente de cultivo (SILVA *et al.*, 2013).

Processos-chave do metabolismo das plantas podem ser afetados pelo déficit hídrico, como a fotossíntese, metabolismo dos carboidratos na folha, bem como a expressão gênica (PINHEIRO; CHAVES, 2011; RAMALHO *et al.*, 2018), acarretando na redução da produtividade vegetal (COELHO *et al.*, 2009; ALTER *et al.*, 2015).

A primeira resposta das plantas quando impostas ao estresse hídrico é o fechamento estomático, alterando assim, as trocas gasosas (MEDEIROS *et al.*, 2013; GUAN *et al.*, 2015; MARTINS *et al.*, 2019), resultando na diminuição da taxa fotossintética e transpiratória (FAVARETTO *et al.*, 2011). Esta estratégia utilizada pelas plantas, o fechamento estomático, visa a menor perda de água pro ambiente através da transpiração foliar, mesmo que

diminuição ou bloqueio simultâneo na captação de CO<sub>2</sub> para a realização da fotossíntese (SEVANTO *et al.*, 2018).

O processo de fechamento estomático também é observado quando o potencial hídrico foliar diminui em decorrência do déficit hídrico no solo (COSTA; MARENCO, 2007). O potencial hídrico representa a energia livre da água e tem sido utilizado por diversos estudos para avaliar o estado hídrico das plantas (BATISTA *et al.*, 2010; 1169 MARRACCINI *et al.*, 2011; PINHEIRO *et al.*, 2005; PRAXEDES *et al.*, 2006).

Além disso, o déficit hídrico pode alterar os pigmentos fotossintéticos (CHEN *et al.*, 2016), o teor relativo de água (CANAVAR *et al.*, 2014), bem como na redução da eficiência fotoquímica e fotoinibição no fotossistema II (FSII) e provocar aumento na atividade das enzimas antioxidantes para controle de espécies reativas de oxigênio (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2016; MARTINS *et al.*, 2016; RAMALHO *et al.*, 2018).

Os pigmentos fotossintéticos como as clorofilas, são responsáveis pela captação de energia luminosa e conversão da mesma em química (TAIZ; ZEIGER, 2013), e quando as mesmas se mantêm em condições adversas, proporcionando maior crescimento e adaptação das plantas a diversos ambientes de cultivo (SILVA *et al.*, 2014).

Aliado ao sistema fotossintético, a eficiência quântica potencial do fotossistema II (FSII – Fv/Fm), que é a máxima absorção de energia que passam pelos centros de reação oxidado, no qual a energia de excitação é dissipada, e sob alta incidência de radiação pode provocar fotoinibição (CINTRA *et al.*, 2020; ROLFE; SCHOLE, 2010; ROUSSEAU *et al.*, 2013).

A eficiência quântica potencial do fotossistema II (FSII), tem sido amplamente utilizada para comparar plantas em condições de estresse (CINTRA *et al.*, 2020; PELOSO *et al.*, 2017; ROLFE; SCHOLE, 2010; ROUSSEAU *et al.*, 2013) e plantas em condições normais de cultivo, apresentam valores de referência de Fv/Fm entre 0,75 e 0,85, indicando que abaixo disso podem estar com a capacidade fotossintética reduzida.

Outra consequência resultante do déficit hídrico nas plantas é a diminuição do teor relativo de água (CANAVAR *et al.*, 2014), que é a comparação de uma quantidade de água de um tecido com a quantidade retida do mesmo em um determinado momento (TAIZ; ZEIGER, 2013) e, tem também sido utilizado como indicador na tolerância quando as mesmas passaram por processos de estresse hídrico (SILVA *et al.*, 2014).

Aliados às características fisiológicas, alguns trabalhos indicam que as características anatômicas, poderia ser uma importante ferramenta tecnológica na distinção e obtenção de plantas com características de tolerância ao déficit hídrico (BATISTA *et al.*, 2010; BALIZA

*et al.*, 2012; CASTANHEIRA *et al.*, 2016; GRISI *et al.*, 2008), como nos vasos condutores, dimensões estomáticas (NASCIMENTO *et al.*, 2006; PINHEIRO *et al.*, 2005), indicando que o maior desenvolvimento dessas estruturas pode favorecer a sobrevivência da planta em diversas condições ambientais (QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

Os estudos realizados com anatomia em plantas de cafeeiro tiveram início na década de 50 (DEDECCA, 1957), sobretudo, houve uma longa pausa nas pesquisas relacionadas a esse tema, conseqüentemente, obtendo-se informações mais restritas na literatura inclusive ligando características anatômicas e fisiológicas do cafeeiro, de ambas as espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora*.

Trabalhos recentes foram desenvolvidos, utilizando anatomia foliar aliando-a às características fisiológicas de plantas de cafeeiro em diferentes tipos de manejos, indicando que esta pode ser uma importante ferramenta para selecionar, caracterizar e distinguir plantas de cafeeiros (BATISTA *et al.*, 2010; GRISI *et al.*, 2008; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014; RAMIRO *et al.*, 2004; REIS, 2013; VIANA *et al.*, 2013; CASTANHEIRA *et al.*, 2016, 2019; BALIZA *et al.*, 2012; NASCIMENTO *et al.*, 2006; GAMA *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Algumas características anatômicas podem ser de extrema importância para o desenvolvimento das plantas frente a mudanças em seu *status* hídrico, temperatura e radiação do ambiente, destacando-se número e diâmetro de vasos condutores, uma vez que os fotoassimilados utilizados pelas plantas são transportados via floema, e a água e sais minerais necessários para realização da fotossíntese seguem via xilema (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009), causando modificações no tamanho e espessura das folhas, estômatos menores e em maior densidade nas plantas (FANG; XIONG, 2015; BALIZA *et al.*, 2012).

Em pesquisa comparando-se cultivares (Siriema e Catuaí) de *Coffea arabica* em condições de suspensão hídrica, maiores diâmetros polar e equatorial dos estômatos, conseqüentemente maior funcionalidade e maior densidade estomática, foram observados em ambas as cultivares, indicando assim maior adaptabilidade e influenciando favoravelmente as plantas (GRISI *et al.*, 2008).

A diminuição na área do tecido vascular pode indicar maior capacidade das plantas na manutenção e transporte hídrico, reduzindo assim a possibilidade de cavitação, uma vez que a embolia é uma das principais causas de morte das plantas para a condição de estresse hídrico (ANDEREGG, 2015; CHOAT *et al.*, 2016). Alguns trabalhos confirmaram que em períodos prolongados de déficit hídrico a embolia pode alcançar níveis tão altos que leva a morte das



plantas impostas a esse estresse (CHOAT, 2013; HOFFMANN *et al.*, 2011; URLI *et al.*, 2013).

O estresse hídrico também pode induzir ao estresse oxidativo nas plantas, resultando em acúmulo de moléculas altamente reativas (espécies reativas de oxigênio-EROs), consequentemente inativando enzimas, ocasionando oxidação de proteínas e danos celulares com a peroxidação lipídica (MILLER *et al.*, 2014).

### **2.3 Estresse oxidativo e mecanismo de defesa antioxidante em plantas sob manejo de suspensão da irrigação**

As plantas quando expostas a diferentes tipos de estresse, seja ele biótico ou abiótico, entram em desequilíbrio, que por sua vez, aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), tais como o superóxido, o peróxido de hidrogênio, oxigênio singlete e radicais hidroxila, chamado de estresse oxidativo (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; FOYER; NOCTOR, 2005), levando assim, a danos celulares e até mesmo acarretar a morte da planta (BARBOSA *et al.*, 2014). As espécies reativas de oxigênio são produzidas a partir de subprodutos da respiração e fotossíntese, e mesmo em condições normais de desenvolvimento, as plantas produzem as EROs mas, em pequena proporção (SHARMA *et al.*, 2012).

As EROs desempenham, além do efeito deletério, um papel benéfico para as plantas dependendo da sua concentração, ou seja, em concentrações elevadas podem causar danos celulares e em menores concentrações podem atuar como mensageiros ou sinalizadoras em plantas que estão sob algum tipo de estresse (MILLER *et al.*, 2010; SHARMA *et al.*, 2012).

Para a eliminação ou reparação das EROS, as plantas acionam um sistema de defesa antioxidante a partir da atividade das enzimas dismutase do superóxido, catalase, peroxidase do ascorbato, peroxirredoxinas, dentre outras (HUANG *et al.*, 2013; SHARMA *et al.*, 2012), que por sua vez também age como sinalizadoras das plantas ao estresse (ANJUM *et al.*, 2017) e metabólitos não enzimáticos, que atuam juntos na eliminação das EROS, reduzindo assim, o dano oxidativo (BARBOSA *et al.*, 2014; GRATÃO *et al.*, 2005). Concomitantemente, há ação não enzimática, realizada, por exemplo, pelo glutathione e o ascorbato (DINAKAR *et al.*, 2012), visto que o ascorbato é um dos antioxidantes mais importantes na inativação de várias espécies reativas de oxigênio (BARBOSA *et al.*, 2014).

A primeira linha de defesa e ativação do sistema antioxidante se dá, pela ação enzimática da dismutase do superóxido (SOD), que por sua vez, catalisa a dismutação de

radicais superóxidos, resultando na produção de  $H_2O_2$  e  $O_2$  (BARBOSA *et al.*, 2014; DAS; ROYCHOUDHURY, 2014), o que impossibilita a formação de radicais hidroxilas pela reação Haber-Weiss (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014). Para eliminação do  $H_2O_2$ , produto da ação da SOD as enzimas catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX) se destacam (BARBOSA *et al.*, 2014; BHATT; TRIPATHI, 2011). Diante disso, a CAT é responsável pela neutralização do  $H_2O_2$ , em  $H_2O$  e  $O_2$ . Esta enzima é muito efetiva, principalmente quando o  $H_2O_2$  se apresenta em altas concentrações, tornando-a indispensável na eliminação das espécies reativas de oxigênio, quando as plantas estão em condições de estresse (BARBOSA *et al.*, 2014; DAS; ROYCHOUDHURY, 2014), mesmo que não seja exigente em um agente redutor para que ocorra a sua atividade (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014).

A CAT e APX são extremamente importantes na eliminação das EROS, a diferença entre as duas é que a APX utiliza um agente redutor, o ascorbato, que possui grande afinidade com o  $H_2O_2$ , formando água como produto final, permitindo a sua eliminação em concentrações menores (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; MHAMDI *et al.*, 2012; LOCATO *et al.*, 2010; SHARMA *et al.*, 2012).

Apesar da eficiência do sistema antioxidante enzimático na eliminação de EROs, há o não enzimático, que por sua vez, adicionalmente ao enzimático, desempenha um papel protetivo contra os danos celulares nos diferentes compartimentos internos da planta, bem como o desempenho vital para o desenvolvimento das plantas (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; PINTO; GARA, 2004). Estes metabólitos antioxidantes não enzimáticos destacam-se pelo ácido ascórbico, a glutatona, o  $\alpha$ -tocoferol e os carotenoides, apresentando o ácido ascórbico como composto de grande importância, visto que o mesmo pode proteger e preservar as atividades enzimáticas para que as mesmas não se liguem a metais (BARBOSA *et al.*, 2014; DAS; ROYCHOUDHURY, 2014).

Estudos realizados em culturas como cana de açúcar (BOARETTO *et al.*, 2014; CIA *et al.*, 2012) e milho (ANJUM *et al.*, 2017; CHEN *et al.*, 2016), mostraram que houve aumento da concentração de peróxido de hidrogênio associando-o com o déficit hídrico, e ocorrendo maior dano ao metabolismo celular em cultivares mais sensíveis. Todavia, é importante enfatizar que em concentrações menores o peróxido pode ser um sinalizador para a planta, e o contrário pode causar danos e morte celular (GILL; TUTEJA, 2010).

Pesquisas mostram que em condições de déficit hídrico, ocorreu aumento na produção de espécies reativas de oxigênio em plantas de café (DAMATTA *et al.*, 2018; LIMA *et al.*, 2002; PINHEIRO *et al.*, 2004), este aumento pode provocar danos celulares, a ácidos

nucleicos, inibição enzimática, peroxidação lipídica, oxidação de proteínas, bem como a ativação da via de morte celular caso as mesmas não sejam neutralizadas (KAN *et al.*, 2010).

A oxidação lipídica agrava o dano oxidativo ocasionado pelo acúmulo de EROs, havendo produção de produtos secundários, dentre eles o malondialdeído (MDA), que é um eficiente marcador molecular utilizado para designar a peroxidação lipídica nas células das plantas, estas submetidas a diferentes estresses abióticos, principalmente o déficit hídrico (CARVALHO, 2008; GILL; TUTEJA, 2010; SHARMA *et al.*, 2012). Resultado da produção de MDA é a diminuição da fluidez e aumento do extravasamento de eletrólitos das membranas celulares, levando a ultrapassagem de substâncias que normalmente não aconteceria e danos a proteínas, enzimas, dentre outras (GILL; TUTEJA, 2010), e a perda ou extravasamento de eletrólitos pode prejudicar a hidratação e turgidez das plantas em condições de déficit hídrico (QUEIROZ *et al.*, 2002).

As menores produções de MDA, mesmo em condições de estresse hídrico, indicam que o sistema de defesa antioxidante enzimático foi eficiente (ANJUM *et al.*, 2017; CARVALHO, 2008), podendo diferenciar plantas que sejam mais tolerantes ou adaptadas a ambientes com estresse hídrico (BOARETTO *et al.*, 2014; SALES *et al.*, 2015), por outro lado, o aumento de MDA nestas condições podem ocasionar maiores danos, o que pode tornar algumas plantas mais sensíveis em relação a outras (ANJUM *et al.*, 2017).

Adicionalmente, como resposta às condições de deficiência hídrica, o café desencadeia a atividade do sistema de defesa antioxidante para limitar os danos celulares (LIMA *et al.*, 2002; RAMALHO *et al.*, 2018), evidenciado na espécie *Coffea canephora* (LIMA *et al.*, 2002). Diante do exposto, um eficiente sistema de defesa antioxidante pode favorecer a maior tolerância de algumas plantas a diversos estresses a elas acometidos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

As avaliações foram realizadas em plantas de acessos existentes no Banco Ativo de Germoplasma localizado na Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, com latitude: 15° 35' 30" e longitude: 47° 42' 30" W. De acordo com a classificação Köppen, o clima da região é classificado como Aw. O clima da área onde foram cultivadas as plantas utilizadas nesse estudo, de acordo com a classificação de Köppen (1948), é do tipo Aw, com duas estações típicas de períodos chuvosos (outubro a abril) e de seca (maio a setembro), com temperatura média anual de 22 °C e precipitação de 1200 mm. O solo da área é um Latossolo Vermelho Escuro com textura argilosa.

Foram utilizados seis clones da espécie *Coffea canephora* (TABELA 1), sendo quatro da variedade Robusta (8, 30, 114 e 125), introduzidos do CIRAD, estes clones são resultantes de um cruzamento entre os clones 126 de *C. canephora* (híbrido congolês x guianense) e A03 (subgrupo SG1 congolês), possuem parte do parentesco pertencente ao subgrupo SG2.

Tabela 1 - Clones de *Coffea canephora* selecionados no Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Cerrados, Planaltina – DF.

Clone	Variedade botânica	Origem
14	Conilon	<sup>1</sup> Incaper – ES
22	Conilon	
125	Robusta	
114	Robusta	<sup>2</sup> CIRAD - Guiana Francesa
30	Robusta	
8	Robusta	

<sup>1</sup> Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, Espírito Santo; <sup>2</sup> LA RECHERCHE AGRONOMIQUE POUR LE DEVELOPPEMENT.

Fonte: Da autora (2020).

Dois clones da variedade Conilon, introduzidos do Incaper, dos quais um é tolerante a seca (14) (PINHEIRO *et al.*, 2004, 2005) e o outro sensível (22) (ALVES *et al.*, 2018; VINECKY; SILVA; ANDRADE, 2012), possuem parentesco ao subgrupo SG1. Os materiais utilizados para análise foram obtidos de mudas propagadas por estacas.

Os clones foram implantados em fevereiro de 2014, utilizando-se espaçamento de 3,6 x 1 m entre plantas. As plantas se encontram em sistema de irrigação via pivô central, com critério de manejo da irrigação fundamentado no balanço hídrico do solo, a partir do Sistema

de Monitoramento de Irrigação no Cerrado (ROCHA *et al.*, 2006), fornecendo a lâmina líquida, intervalo e o momento de irrigação.

No segundo ano após o plantio, foi utilizada a suspensão da irrigação, no período entre 24 de junho ao início de setembro, visando uniformização da florada e maior produção de cafés no estágio cereja (GUERRA *et al.*, 2005). Para adubação, houve o fornecimento de fósforo no plantio e anualmente, com  $300 \text{ kg. ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ , sendo o de manutenção parcelada em dois terços após a volta da irrigação (setembro) e um terço no mês de dezembro. Para o fornecimento de nitrogênio e potássio, no segundo ano foram utilizados  $450 \text{ kg. ha}^{-1}$  do nutriente, parcelados em quatro vezes. Os micronutrientes foram fornecidos com  $100 \text{ kg. ha}^{-1}$  de FTE BR 12, aplicados via cobertura em dezembro.

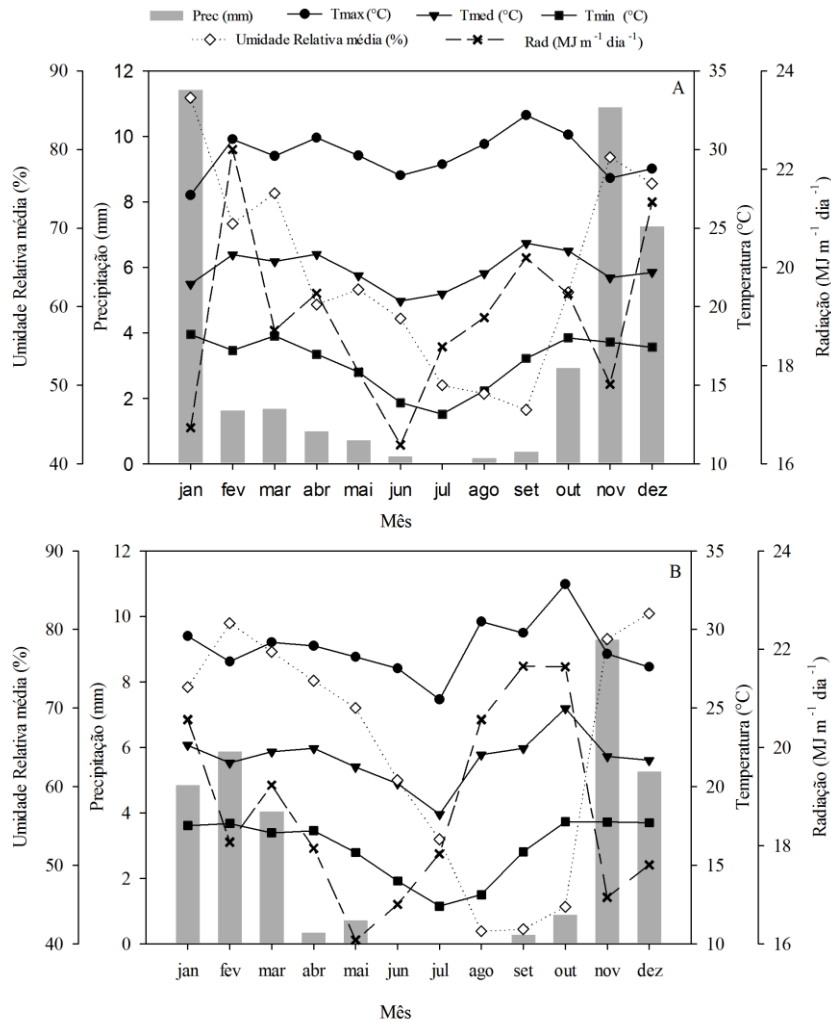
### 3.1 Características avaliadas

As mensurações das características avaliadas foram realizadas em períodos distintos, para acompanhar o comportamento dos clones antes, durante e após período de suspensão hídrica compreendendo: Antes do período de suspensão da irrigação (APSI) – ocorre uma nova indução e maturação das gemas florais; final do período de suspensão da irrigação (FPSI) - indução e maturação das gemas florais que, dois dias após o retorno da irrigação (2dARI), proporciona florada com o aumento do potencial hídrico das gemas; três meses após o retorno da irrigação (3mARI) – granação de frutos. As avaliações foram realizadas nos anos de 2016 e 2017.

Os dados climáticos foram monitorados, por meio de uma estação meteorológica automática, localizada na EMBRAPA Cerrados – Planaltina/DF, obtendo dados como volume das chuvas (precipitação), temperaturas máxima, média e mínima, umidade relativa média do ar e radiação (FIGURA 1).

A caracterização climática referente aos dois anos de avaliação do presente trabalho está ilustrada na Figura 1. Foi observado um decréscimo na precipitação entre os meses de fevereiro a outubro de 2016 e março a outubro de 2017. Adicionalmente, verificou-se que os menores registros de precipitação ocorreram em 2017. Quanto à umidade relativa, notou-se que em 2016, entre julho a setembro, e em 2017, entre julho a outubro, os valores registrados atingiram seus níveis mais baixos. Ademais, sob tais condições climáticas, percebe-se que o comportamento dos clones avaliados seja uma resposta a maior demanda evapotranspirativa resultante da menor precipitação aliada a altas temperaturas, durante o período de restrição imposta.

Figura 1 – Representação gráfica das variáveis climatológicas registradas nos dois anos de avaliação 2016 (A) e 2017 (B).



Fonte: Da autora (2020).

Foram realizadas análises anatômicas, fisiológicas e bioquímicas, selecionando-se folhas completamente expandidas, do terceiro ou quarto par, no terço médio dos ramos plagiotrópicos das plantas.

### 3.1.1 Características anatômicas

As avaliações anatômicas foram realizadas em três períodos, compreendendo APSI, FPSI e 3mARI. Ressalta-se que as folhas coletadas em APSI foram homólogas às coletadas no FPSI, já que durante o período de suspensão da irrigação não houve formação de novas

folhas. Já a avaliação de 3mARI, refere-se a novas folhas formadas após o período de suspensão da irrigação.

Para os estudos anatômicos das secções transversais, foram fixadas folhas em etanol 70% (v v<sup>-1</sup>) (JOHANSEN, 1940) por aproximadamente 72 horas e, trocado posteriormente pelo mesmo reagente para conservação das amostras. As secções paradérmicas foram obtidas em folhas frescas a partir da técnica de impressão da epiderme (SEGATO *et al.*, 2004), colocando-se uma gota de adesivo instantâneo universal (éster de cianoacrilato) sobre uma lâmina de vidro e posteriormente a parte central da folha, permitindo assim, a separação da epiderme da mesma.

Para a obtenção das secções transversais, o material vegetal foi submetido a concentrações crescentes de etanol (70%, 80%, 90% e 100%), em intervalos de 2 horas. As amostras foram incorporadas em historesina de acordo com as instruções do fabricante (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemanha), obtendo-se secções (8 µm de espessura) com o auxílio de um micrótomo rotativo semiautomático modelo MRP 2015 da marca Lupetec Tecnologia Aplicada (Lupe Indústria Tecnológica de Equipamentos para Laboratório, Brasil). As secções foram coradas com azul de toluidina a 1% (m v<sup>-1</sup>) e montadas com verniz vitral (PAIVA *et al.*, 2006).

As lâminas obtidas foram observadas e fotografadas em microscópio óptico, modelo Red 200, marca Kasvi/Motic, acoplado à câmera digital modelo D-Moticam 5MP marca Motic. Posteriormente, as imagens foram analisadas em software para análise de imagens UTHSCSA-Imagetool.

Nas secções paradérmicas foram avaliados o número de estômatos (ne), que foi utilizado para calcular a densidade estomática (den=ne/mm<sup>2</sup>) e; diâmetro polar (dp - µm) e diâmetro equatorial dos estômatos (de - µm) utilizados para a relação entre o diâmetro polar e o diâmetro equatorial (dpde). As características avaliadas nas secções transversais foram área total da região do xilema (ax - µm<sup>2</sup>), área total da região do floema (af - µm<sup>2</sup>), número de vasos do xilema (nvx); diâmetro de vasos do metaxilema (dvx- µm), frequência dos vasos do xilema (fvx - nvx/ax\*1000000 – mm<sup>2</sup>), índice de vulnerabilidade (iv), calculado conforme proposto por Carlquist (1988) (razão dvx e fvx). A condutividade hidráulica relativa (chr) foi estimada usando equação de Hagen - Poiseuille modificada (FAHN *et al.*, 1986):  $chr = r^4 * fvx - \mu^4 m 10^6$ , onde r é o raio individual dos vasos xilemáticos (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

### 3.1.2 Análises fisiológicas

As avaliações das características fisiológicas foram realizadas em todas os períodos, compreendendo APSI, FPSI, 2dARI e 3mARI. A avaliação em 2dARI, ocorreu para verificar como ocorre recuperação das plantas logo após a reidratação.

Para avaliação das trocas gasosas, utilizou-se um sistema de análise de gases por infravermelho (IRGA LICOR – 6400XT), onde foi quantificada a taxa fotossintética líquida ( $A - \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a condutância estomática ao vapor de água ( $g_s - \text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), relação entre a concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  no mesofilo e a concentração de  $\text{CO}_2$  externa atual ( $C_i/C_a$ ), a concentração interna de carbono, a taxa transpiratória ( $E - \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), realizada no período da manhã (9h-11h), sob luz saturante ( $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Com os dados obtidos, foram calculadas a eficiência instantânea do uso da água e a eficiência de carboxilação ( $WUE - A/E$ ) ( $CUE - A/C_i$ ), respectivamente (SANTOS *et al.*, 2017).

O potencial hídrico foliar ( $\psi_w$ ) foi medido no período antemanhã, com uma bomba de pressão tipo Scholander (PMS Instruments Plant Moisture - Modelo 1000).

A eficiência quântica potencial ( $F_v/F_m$ ) e efetiva ( $Y$ ) do fotossistema II da fotossíntese foi determinada com o auxílio do fluorímetro portátil OS5-p (Opti-Sciences, EUA), no período da manhã entre 9 e 11h. Para obtenção de  $F_v/F_m$  o segmento foliar passou por um período de adaptação ao escuro por 30 minutos.

Os índices de clorofila a, b e total foram obtidos por meio do medidor portátil de clorofila ClorofiLOG (FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA, BRASIL), que fornece valores denominados índices de clorofila Falker (ICF) proporcionais à absorbância das clorofilas. Os índices obtidos com o ClorofiLOG são equivalentes aos teores relativos das clorofilas a, b e total (BARBIERI JÚNIOR *et al.*, 2012).

Para a determinação do conteúdo relativo de água (CRA - %), posterior à coleta, as folhas foram levadas para o laboratório e, retirados 10 discos foliares (com diâmetro 1 cm) e imediatamente pesados em balança de precisão, obtendo-se a massa de matéria fresca do disco ( $M_f \text{ g disco}^{-1}$ ). Em seguida, os discos foram colocados em tubos falcon, cobertos com água destilada e após aproximadamente 12 h em sob agitação em shaker com velocidade de rotação de 100rpm, posteriormente os discos foram secos em papel toalha e pesados novamente para obtenção da massa de matéria fresca saturada ( $M_{st} \text{ g disco}^{-1}$ ). Realizada esta operação, o material foi colocado em estufa com circulação forçada de ar ( $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por 24 horas, obtendo-se assim a massa de matéria seca ( $M_s \text{ g disco}^{-1}$ ), segundo metodologia proposta por Barrs e Weatherley (1962).

$$CRA = \left[ \frac{(M_f - M_s)}{(M_{st} - M_s)} \right] \times 100 \quad (1)$$



Para a quantificação do extravasamento de eletrólitos (EE), foram obtidos discos foliares maduros com 1 cm de diâmetro e os mesmos foram colocados em tubos falcon com 60mL de água deionizada e incubados a 25 °C sob agitação por aproximadamente 12h. Posteriormente, foi realizada a primeira leitura de condutividade elétrica (CE1/ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) em condutivímetro (HACH sension 156 pH). Logo em seguida, as amostras foram autoclavadas a 121 °C, por 20 minutos (ORO, 2012 – Com modificações), sendo, então, determinada a condutividade elétrica novamente (CE2). O valor do extravasamento de eletrólitos foi obtido pela porcentagem de eletrólitos extravasados em relação aos eletrólitos totais conforme a seguinte fórmula:

$$EE = \frac{CE1}{CE2} \times 100 \quad (2)$$

### 3.1.3 Características bioquímicas

Para os ensaios bioquímicos, coletou-se as folhas no período da tarde, entre 12 e 13h e acondicionadas em nitrogênio líquido e armazenadas em ultra freezer a -80 °C, para posterior maceração e obtenção dos extratos. As coletas foram realizadas em todos os períodos de avaliação citados acima.

#### 3.1.3.1 Metabolismo antioxidante

Para a determinação da atividade das enzimas do sistema antioxidante, utilizou-se como referência o protocolo de extração de Biemelt, Keltman e Albert (1980), obtendo-se o extrato através da maceração de 100mg de tecido foliar em nitrogênio líquido e 50% de polivinilpolipirrolidona (PVPP), posteriormente homogeneizado com 3.5mL do seguinte tampão de extração: fosfato de potássio 100mM, pH 7.8, EDTA 0.1mM e ácido ascórbico 10mM. Após, o extrato foi centrifugado a 13.000g por 10min, a 4 °C. Os sobrenadantes foram coletados e utilizados nas análises da dismutase do superóxido (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX).

A atividade da SOD foi avaliada pela capacidade da enzima em inibir a fotorredução do azul de nitrotetrazólio (NBT) proposta por Giannopolis e Ries (1977) com modificações. Diferentes alíquotas foram adicionadas ao meio de incubação composto por fosfato de

potássio 50mM, pH 7.8, metionina 14mM, EDTA 0.1  $\mu$ M, NBT 75 $\mu$ M e riboflavina 2 $\mu$ M e água destilada. Posteriormente, as microplacas foram iluminadas com lâmpada fluorescente de 20 W por sete minutos e realizaram-se as leituras a 560nm. Uma unidade da SOD corresponde à quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT nas condições do ensaio.

Para a determinação da CAT utilizou-se o protocolo de Mengutay *et al.* (2013) com modificações, em que diferentes alíquotas do sobrenadante foram adicionadas ao meio de incubação, contendo tampão fosfato 45mM e pH 7.6, Na<sub>2</sub>EDTA 0.1mM (dissolvido no tampão) e peróxido de hidrogênio 10mM. A determinação dessa enzima foi obtida pelo decréscimo na absorvância a 240nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio. O coeficiente de extinção molar utilizado foi 36mM<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>.

A atividade da APX foi determinada pelo acompanhamento da taxa de oxidação do ascorbato a 290nm, a cada 15 segundos, por três minutos (NAKANO; ASADA, 1981) para café, com modificações. Para isso, diferentes alíquotas do sobrenadante foram adicionadas ao meio de incubação contendo tampão fosfato de potássio 50mM com pH 6.0, ácido ascórbico 0.8mM e peróxido de hidrogênio 1mM. O coeficiente de extinção molar utilizado foi 2.8mM<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>.

Nestas análises foram utilizadas microplacas de microtitulação de 96 poços e as leituras foram realizadas em leitora de microplacas por multidetecção Synergy™ HTX.

### 3.1.3.2 Quantificação do Ascorbato

A quantificação de ascorbato foi determinada de acordo com Arakawa *et al.* (1981), em que 50mg de matéria fresca foram macerados e homogeneizado com ácido tricloroacético (TCA 5%) (m/v) e centrifugado a 10.000 g, por 15min, a 4° C. Foi adicionada uma alíquota do sobrenadante ao meio de reação composto por: TCA 5% (m/v), etanol 99.8% (v/v), ácido ascórbico, ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) 0.4% em etanol (v/v), batofenantrolina 0.5% em etanol (p/v) e cloreto de ferro (III) (FeCL<sub>3</sub>) em etanol (m/v). Em seguida, este meio foi homogeneizado e incubado a 30 °C, por 90 minutos. A determinação da concentração de ascorbato deu-se com a absorvância das amostras a 534nm e com base na curva-padrão com concentrações conhecidas.

### 3.1.3.3 Quantificação de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e peroxidação lipídica

O material vegetal (100mg) foi macerado em nitrogênio líquido e homogeneizado em TCA 0.1% (m/v). Após, as amostras foram centrifugadas a 12000g por 15 minutos, a 4°C.

Para a quantificação do peróxido de hidrogênio, alíquotas do sobrenadante foram adicionadas ao meio de reação composto por tampão fosfato de potássio 10mM pH 7.0 e iodeto de potássio 1M, em microplacas de microtitulação de 96 poços. Determinou-se a concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pela absorbância das amostras a 390nm com base na curva-padrão de concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> conhecidas (VELIKOVA; YORDANOV; EDREVA, 2000), com modificações.

Na quantificação da peroxidação lipídica, alíquotas foram adicionadas em microtubos do tipo eppendorf ao meio de reação contendo 0.5% (m/v) de ácido tiobarbitúrico (TBA) e 10% (m/v) de TCA. Em seguida, o meio foi incubado a 95 °C, por 30 minutos, paralisando a reação por resfriamento rápido em gelo e realizando as leituras em 535nm e 600nm em microplacas de microtitulação de 96 poços. O TBA forma complexos de cor avermelhada, como o malondialdeído (MDA), produto secundário do processo de peroxidação. A concentração do MDA foi calculada pela seguinte equação:  $[MDA] = (A_{535} - A_{600}) / (\xi \times b)$ , em que  $\xi$  (coeficiente de extinção molar =  $1,56 \times 10^{-5}$ ); b (comprimento óptico = 1). A peroxidação é expressa em  $\eta$ mol de MDA.g<sup>-1</sup>MF.

## 3.2 Análise estatística

Foi utilizado delineamento ao acaso, com seis clones, seis (características anatômicas e fisiológicas) e três repetições (características bioquímicas). Os dados obtidos foram submetidos às pressuposições da ANOVA, verificando a normalidade e homogeneidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk e de Bartlett, respectivamente, utilizando o programa R (R Core Team, 2019), por meio do pacote Agricolae (MENDIBURU, 2014).

Posteriormente, os dados anatômicos, fisiológicos foram analisados por meio de variáveis canônicas utilizando o programa R (R CORE TEAM, 2019), através do pacote Candisc (FRIENDLY; FOX, 2017). Para as características anatômicas e fisiológicas foi realizada uma seleção das variáveis que mais contribuíram na dispersão dos clones e que somente para essas foi apresentado o teste de médias (RIBEIRO *et al.*, 1999).

Realizou-se a análise de variância com a significância das fontes de variação verificada pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade, que por sua vez para o estudo das

médias, utilizou-se o teste de Skott-Knott pelo programa Genes (CRUZ, 2013), para todas as características analisadas.

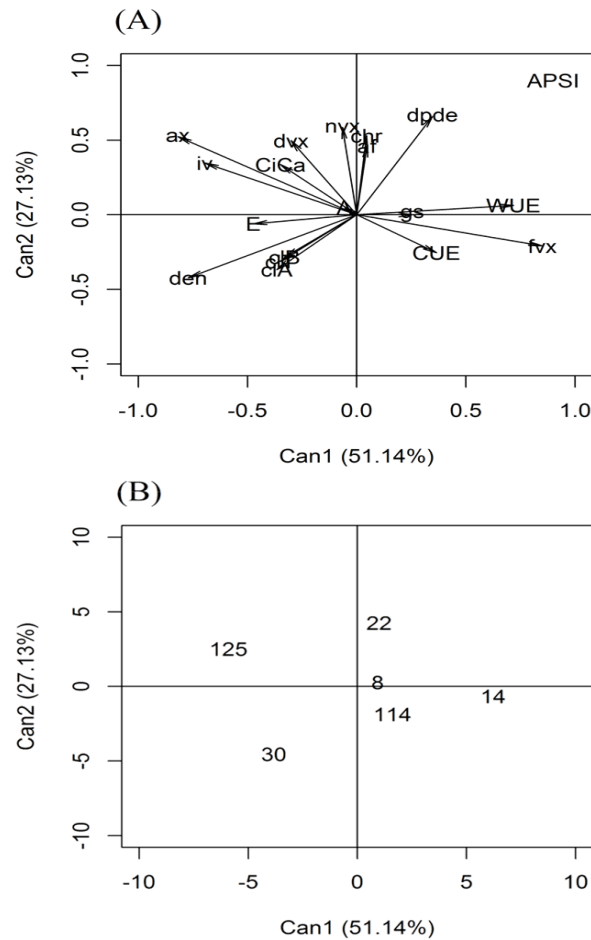
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Características anatômicas e fisiológicas

De acordo com os resultados obtidos, os clones avaliados apresentaram diferentes comportamentos entre os períodos de avaliação dentro de cada ano de desenvolvimento e produção.

Na análise canônica antes do período de suspensão da irrigação (APSI) do ano de 2016, verificou-se que as duas primeiras variáveis explicaram 78,27% da variabilidade das respostas (FIGURA 2).

Figura 2 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, antes do período de suspensão da irrigação. (A) Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones estudados, baseada nas características avaliadas no ano de 2016.



Fonte: Da autora (2020).

Representando a dispersão gráfica com maior peso positivo na primeira canônica, que explica 51,14% da variabilidade total, está eficiência instantânea do uso da água (WUE) e frequência dos vasos do xilema (fvx) (FIGURA 2A). As variáveis, densidade estomática (den), área total dos vasos do xilema (ax) e índice de vulnerabilidade (iv) foram negativamente relacionadas com a primeira canônica. Já a segunda canônica explicou 27,13% da variabilidade e apresentou as variáveis anatômicas, relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (dpde), área total do xilema (ax), número (nvx) e diâmetro dos vasos do xilema (dvx) e condutividade hidráulica relativa (chr) positivamente relacionadas (FIGURA 2A).

O comportamento dos clones 8, 114 e 14, se deu por apresentarem menores valores médios de índice de vulnerabilidade (iv), entretanto, o clone 14 se destacou por maiores valores de eficiência do uso da água (WUE), frequência dos vasos do xilema (fvx) e menor valor médio para a característica área total dos vasos do xilema (ax) (FIGURA 2 e TABELA 2).

Tabela 2 - Valores médios de eficiência do uso da água (WUE- A/E), frequência de vasos do xilema (fvx – VX/ mm<sup>2</sup>), relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (dpde),

densidade estomática (den - NE/ mm<sup>2</sup>), área do xilema (ax - μm<sup>2</sup>), índice de vulnerabilidade (iv), número de vasos do xilema (nvx), diâmetro de vasos do xilema (dvx - μm) e condutividade hidráulica relativa (chr- μm<sup>4</sup> 10<sup>6</sup>) de diferentes clones de *Coffea canephora* antes do período de suspensão da irrigação (APSI). 2016.

Clone	WUE		fvx		dpde		den		ax	
14	7,03	a	1079,25	a	1,58	b	311,53	c	98352,26	e
22	5,15	c	700,75	d	1,68	a	304,1	c	158974,8	b
8	6,24	b	848,79	c	1,64	a	332,15	b	134363,9	c
125	4,4	d	634,22	d	1,54	b	369,52	a	187611,9	a
114	4,47	d	943,58	b	1,53	b	324,91	b	113528,7	d
30	4,56	d	652,17	d	1,49	b	382,08	a	142534,7	c
Clone	iv		nvx		dvx		chr			
14	0,0153	b	105,67	b	16,31	b	4,80	b		
22	0,0292	a	107,83	b	20,08	a	7,45	a		
8	0,0202	b	113,83	a	17,00	b	4,46	b		
125	0,0299	a	118,67	a	18,86	a	5,52	b		
114	0,0179	b	106,67	b	16,62	b	4,80	b		
30	0,0271	a	92,5	c	17,43	b	3,74	b		

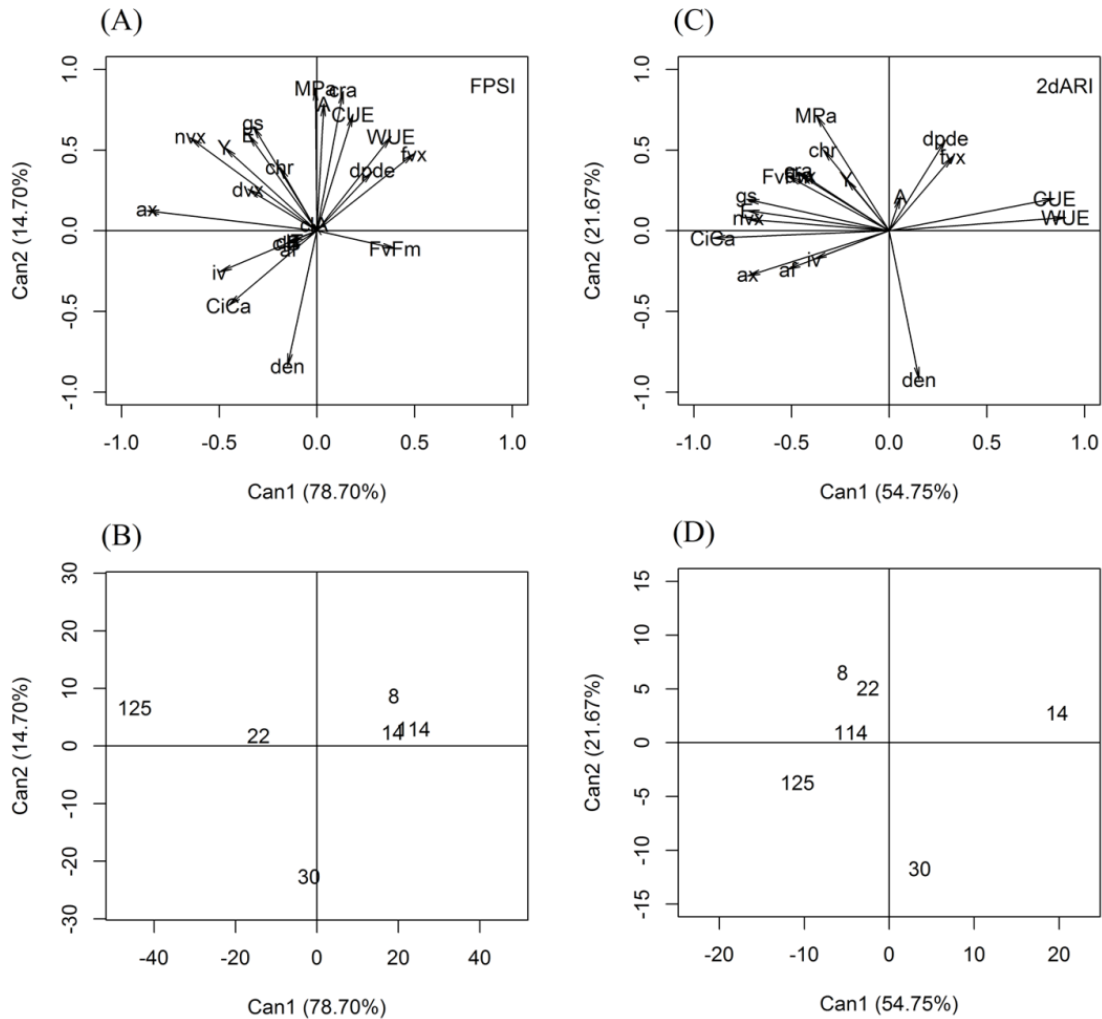
Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.  
Fonte: Da autora (2020).

Ressalta-se que apesar da dispersão próxima, os clones 8 e 114 apresentaram comportamento intermediário, ou seja, não houve característica que os destacassem dos demais ou contribuíssem para a dispersão dos mesmos (FIGURA 2, TABELA 2).

O maior valor médio de número de vasos de xilema contribuiu para a dispersão dos clones 125 e 8 (FIGURA 2 e TABELA 2), no entanto, o clone 125 se destacou por apresentar maior valor médio de área total dos vasos do xilema (ax) e maior densidade estomática (den). Já para a dispersão do clone 22, os maiores valores médios de condutância hidráulica relativa (chr), relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (dpde) e diâmetro dos vasos do xilema (dvx) contribuíram com maior peso (FIGURA 2 e TABELA 2). Para o clone 30, o maior valor médio de densidade estomática (den) e menor valor do número de vasos do xilema, contribuíram para a dispersão desse clone (FIGURA 2 e TABELA 2).

No final do período da suspensão da irrigação (FPSI), as duas primeiras variáveis canônicas explicaram 93,40% da variabilidade dos dados (FIGURA 3). Desse total, a primeira canônica explicou 78,70% e, positivamente relacionada está à frequência total dos vasos do xilema (fvx), e as características área total (ax) e número de vasos do xilema (nvx) e índice de vulnerabilidade (iv), negativamente relacionadas (FIGURA 3A).

Figura 3 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* função estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, no final do período de suspensão da irrigação (FPSI – A e B) e dois dias após o retorno da irrigação (2dARI – C e D). (A e C) Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B e D) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas no ano de 2016.



Fonte: Da autora (2020).

Na segunda canônica, que explicou 14,70% da variabilidade dos dados (FIGURA 3), as variáveis taxa fotossintética líquida (A), taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs), eficiência do uso da água (WUE), conteúdo relativo de água (cra), potencial hídrico foliar (MPa), eficiência de carboxilação (CUE), eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y) e número de vasos do xilema (nvx) foram positivamente relacionadas, enquanto densidade estomática (den) foi negativamente (FIGURA 3A).

Observa-se que maiores valores de frequência dos vasos do xilema (fvx) e menor valor médio de índice de vulnerabilidade (iv), contribuíram para a proximidade da dispersão dos

clones 8, 114 e 14 (FIGURA 3 e TABELA 3). É interessante observar que o mesmo comportamento ocorreu em APSI (FIGURA 2), para a variável índice de vulnerabilidade (iv).

Tabela 3 - Valores médios de taxa fotossintética (A -  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), taxa transpiratória (E -  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs -  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), eficiência do uso da água (WUE- A/E), relação concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  no mesofilo/concentração de  $\text{CO}_2$  externa atual (CiCa), eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), conteúdo relativo de água (cra -%), eficiência de carboxilação (CUE), potencial hídrico antemanhã (MPa), densidade estomática (den -  $\text{NE/mm}^2$ ), área do xilema (ax -  $\mu\text{m}^2$ ), frequência de vasos do xilema (fvx) e número de vasos de xilema (nvx) de diferentes clones de *Coffea canephora* no final do período de suspensão da irrigação (FPSI). 2016.

Clone	A	E	gs	WUE	Y	cra	CUE
14	4,49 a	0,8 b	0,0421 b	5,51 a	0,172 a	61,61 b	0,0217 a
22	3,57 b	0,83 b	0,046 b	4,56 a	0,158 a	59 b	0,0142 b
8	4,99 a	1,01 a	0,0532 a	4,92 a	0,096 b	71,09 a	0,0215 a
125	4,62 a	1,24 a	0,0622 a	3,79 b	0,176 a	64,16 b	0,0179 b
114	3,82 b	0,86 b	0,0412 b	4,47 a	0,095 b	64,38 b	0,0164 b
30	1,54 c	0,56 c	0,0247 c	2,79 c	0,069 c	40,47 c	0,0056 c

Clone	MPa	den	ax	fvx	nvx	iv
14	-1,76 b	341,27 b	95949 d	6485,89 a	103,16 d	0,0144 c
22	-3,06 c	299,64 c	144912 b	4897,66 b	117,83 c	0,0243 a
8	-1,23 a	291,45 c	133446 b	5895,61 a	130,16 b	0,0181 c
125	-0,9 a	363,58 b	199142 a	5253,36 b	173,50 a	0,0200 b
114	-1,65 b	349,45 b	118889 c	6027,86 a	124,25 b	0,0164 c
30	-4,63 d	475,84 a	136478 b	4610,05 b	98,60 d	0,0214 b

Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.

Fonte: Da autora (2020).

Já o clone 8 se destacou em relação aos clones 14 e 114, por apresentar maiores valores médios de taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs) e conteúdo relativo de água (cra) (FIGURA 3 e TABELA 3). Para o clone 22, o maior valor de índice de vulnerabilidade contribuiu para a sua dispersão em relação aos demais.

Os menores valores médios de taxa fotossintética (A), transpiratória (E), condutância estomática (gs), eficiência do uso da água (WUE), eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), conteúdo relativo de água (cra), eficiência de carboxilação (CUE), potencial hídrico foliar (MPa), número de vasos do xilema (nvx) e maior valor médio de densidade estomática (den), contribuíram para a dispersão isolada do clone 30 (FIGURA 3 e TABELA 3). As características que contribuíram para a dispersão do clone 125 foram os maiores valores de área total (ax) e número dos vasos de xilema (nvx).



Dois dias após o retorno da irrigação, as duas primeiras canônicas explicaram 76,42% da variabilidade dos dados (FIGURAS 3C e D). A primeira canônica com maior peso (54,75%) apresentou positivamente relacionada à eficiência do uso da água (WUE) e de carboxilação (CUE), enquanto que negativamente a taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (Ci/Ca), eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), área total do xilema (ax), área total do floema (af) e número de vasos do xilema (nvx) (FIGURA 3C). Na segunda canônica, que explica 21,67% da variabilidade dos dados, o potencial hídrico foliar (MPa), relação diâmetro polar e equatorial (dpde) e condutância hidráulica relativa (chr) foram positivamente relacionados (FIGURA 3A), enquanto a densidade estomática foi negativamente (FIGURA 3A).

A relação dpde contribuiu para a dispersão dos clones 14, 22 e 8, entretanto, o afastamento do clone 14, foi observado pelos maiores valores médios de eficiência do uso da água (WUE) e de carboxilação (CUE), bem como menores valores de área total do xilema (ax), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (Ci/Ca), taxa transpiratória (E) e área total do floema (af).

Já a proximidade dos clones 22 e 8 foi pelo menor valor de densidade estomática, e o maior valor de condutância hidráulica relativa contribuiu o destaque do clone 22 (TABELA 4).

Tabela 4 - Valores médios de eficiência do uso da água (WUE- A/E), eficiência de carboxilação (CUE – A-Ci), taxa transpiratória (E - mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (gs - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), potencial hídrico foliar (MPa), área do xilema (ax - μm<sup>2</sup>), área do floema (af - μm<sup>2</sup>), número de vasos de xilema (nvx), relação diâmetro polar e equatorial estomática (dpde), densidade estomática (den - mm<sup>2</sup>) e condutividade hidráulica relativa(chr - μm<sup>4</sup> 10<sup>6</sup>) de diferentes clones de *Coffea canephora* dois dias após o retorno da irrigação (2dARI). 2016.

Clone	WUE	CUE	E	gs	CiCa	Fv/Fm	MPa
14	5,750 a	0,103 a	1,020 d	0,028 d	0,104 c	0,755 b	-0,627 c
22	1,790 c	0,011 c	1,610 c	0,049 c	0,671 a	0,773 b	-0,508 b
8	2,460 b	0,025 b	2,370 b	0,068 b	0,598 b	0,806 a	-0,397 a
125	2,120 c	0,022 b	2,550 b	0,071 b	0,642 a	0,786 a	-0,607 c
114	2,010 c	0,024 b	3,040 a	0,084 a	0,650 a	0,800 a	-0,405 a
30	2,670 b	0,018 b	1,410 c	0,037 d	0,532 b	0,756 b	-0,772 d
Clone	ax	af	nvx	dpde	den	chr	
14	95949 d	75374,2 b	103,17 d	1,580 a	341,27 b	3,930 c	
22	144912 b	84734,8 a	117,83 c	1,540 a	299,63 c	7,860 a	
8	133446 b	90479,7 a	130,17 b	1,570 a	291,45 c	6,070 b	
125	199142 a	90525,4 a	173,50 a	1,440 b	363,57 b	5,170 c	
114	118889 c	90766,5 a	124,25 b	1,450 b	349,45 b	4,560 c	
30	136478 b	91315,1 a	98,60 d	1,420 b	475,85 a	3,320 c	

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.  
Fonte: Da autora (2020).

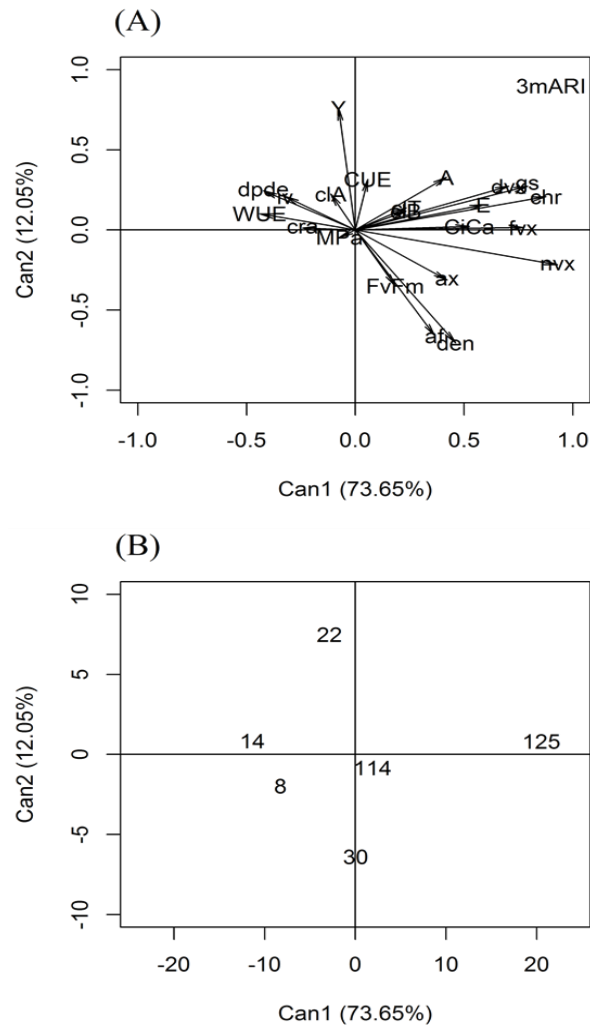
O clone 114 apresentou maiores valores médios de taxa transpiratória (E) e condutância estomática (gs) e proximidade com o clone 8 por maior valor médio de potencial hídrico foliar (Mpa).

O clone 30 apresentou uma dispersão isolada dos demais por maior valor médio de densidade estomática (den) e menor potencial hídrico (MPa), sendo observado mesmo comportamento no período FPSI (FIGURA 3D e TABELA 4).

O maior valor médio de eficiência do uso da água, bem como menores valores de taxa transpiratória (E), relação CiCa, área total do xilema (ax) e do floema (af), contribuíram para a dispersão isolada do clone 14. Já para a dispersão do clone 125 os maiores valores médios de área total do xilema (ax) e número de vasos do xilema (nvx) tiveram maior peso (FIGURA 3D e TABELA 4).

Três meses após o retorno da irrigação, as duas primeiras variáveis canônicas explicaram 85,70% da variabilidade dos dados (FIGURA 4).

Figura 4 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, três meses após o retorno da irrigação. Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2016.



Fonte: Da autora (2020).

Para a canônica 1, a qual explica a maior parte da variabilidade dos dados (73,65%), as características taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (Ci/Ca), número (nvx), diâmetro (dvx) e frequência dos vasos do xilema (fvx), bem como a condutância hidráulica relativa (chr), apresentaram maior contribuição positiva. A variável canônica 2 representou 12,05% da variação dos dados, e a eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), foram positivamente relacionadas, enquanto que a Área do floema (af) e densidade estomática (den) negativamente.

Diferentemente dos outros períodos analisados, em 3mARI a dispersão dos clones foi bem variável (FIGURA 4B). O menor valor médio de condutância hidráulica relativa (chr), contribuiu para a aproximação dos clones 8 e 14 (FIGURA 4B e TABELA 5).

Tabela 5 - Valores médios de taxa transpiratória (E -  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs -  $\text{gs - mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), relação concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  no mesofilo/concentração de  $\text{CO}_2$  externa atual (CiCa), eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), número de vasos de xilema (nvx), diâmetro de vasos do xilema (dvx-  $\mu\text{m}$ ), frequência de vasos do xilema (fvx), condutividade hidráulica relativa (chr -  $\mu\text{m}^4 10^6$ ), densidade estomática (den -  $\text{NE/mm}^2$ ) e área total do floema (af -  $\mu\text{m}^2$ ) de diferentes clones de *Coffea canephora* três meses após o retorno da irrigação (3mARI). 2016.

Clone	E	gs	CiCa	Y	nvx					
14	1,71	b	0,062	c	0,53	c	0,304	a	113,33	c
22	2,66	a	0,104	b	0,64	b	0,299	a	112,67	c
8	2,2	b	0,074	c	0,67	a	0,219	c	103,17	c
125	3,22	a	0,143	a	0,72	a	0,267	b	199,67	a
114	2,4	b	0,082	c	0,61	b	0,202	c	143,67	b
30	2,35	b	0,084	c	0,63	b	0,183	c	150,67	b

Clone	dvx	fvx	chr	den	af					
14	15,55	c	753,02	b	2,79	c	295,92	b	84763,46	b
22	20,01	a	743	b	7,46	b	246,1	c	73763,64	b
8	17,61	b	660,48	b	3,95	c	297,4	b	100188,01	a
125	21,21	a	1124,4	a	14,37	a	362,09	a	109170,61	a
114	19,49	a	821,59	b	7,64	b	296,66	b	96510,82	a
30	18,11	b	797,62	b	5,48	b	387,37	a	116855,21	a

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na vertical constituem grupo estatisticamente homogêneo.

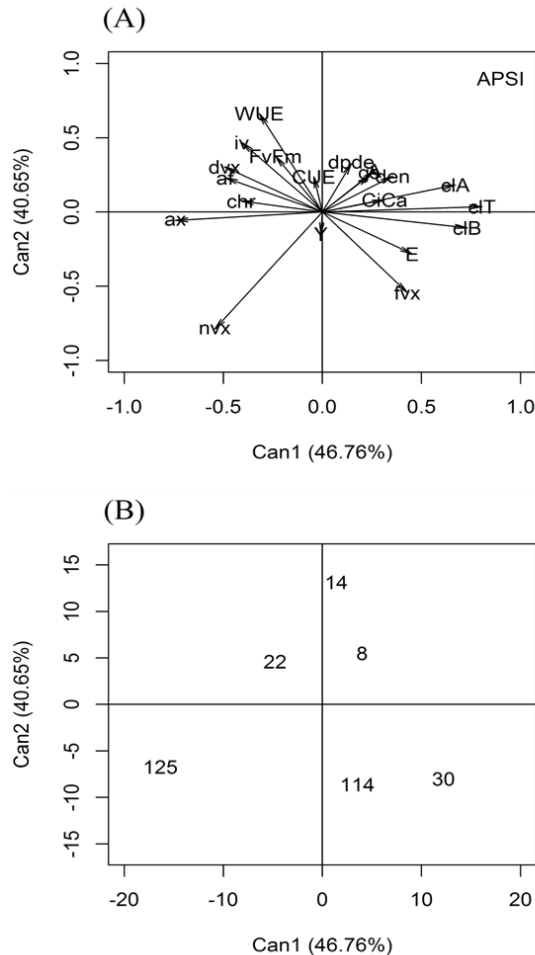
Fonte: Da autora (2020).

O clone 125 apresentou maiores valores de taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs), relação concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  no mesofilo/concentração de  $\text{CO}_2$  externa atual (CiCa), frequência (fvx) e número (nvx) dos vasos do xilema, densidade estomática (den), e condutância hidráulica relativa (chr) (FIGURA 4B e TABELA 5), contribuindo assim para a sua dispersão isolada em relação aos demais clones.

A contribuição na dispersão do clone 22 se deu por maior valor médio de eficiência quântica efetiva do fotossistema II (Y), e menores valores de densidade estomática (den) e área do floema (af) (FIGURA 4B E TABELA 5). Maior valor médio diâmetro dos vasos o xilema (dvx), contribuiu para a dispersão dos clones 22, 125 e 114. Já o clone 30, apresentou os menores valores médios para a maioria das características avaliadas, exceto densidade estomática e área do floema, o que contribuiu para o seu isolamento na dispersão gráfica.

Na análise canônica realizada no período APSI, do ano de 2017, verificou-se que para a primeira canônica, que explica a maior parte da variabilidade total dos dados (46,76% de 87,41%), as variáveis taxa transpiratória (E), índices de clorofila a, b e total (clA, clB, clT) e frequência dos vasos do xilema (fvx), apresentaram maior contribuição positiva (FIGURA 5A).

Figura 5 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, antes do período de suspensão da irrigação. Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2017.



Fonte: Da autora (2020).

Já as variáveis, área total do floema (af), área total do xilema (ax), número (nvx) e diâmetro de vasos do xilema (dvx), índice de vulnerabilidade (iv) e condutividade hidráulica relativa (chr) foram negativamente relacionadas (FIGURA 5A).

Na segunda canônica (40,65%), a eficiência do uso da água (WUE), índice de vulnerabilidade (iv) e condutância hidráulica relativa (chr), apresentaram maior relação positiva, enquanto que o número (nvx) e frequência dos vasos de xilema (fvx) negativa (FIGURA 5A).

Maiores valores médios de área total do xilema contribuiu para a dispersão dos clones 22 e 125, no entanto, maiores valores de número de vasos de xilema (nvx) e condutância hidráulica relativa (chr), bem como menores valores dos índices das clorofilas A, B e total, destacou o clone 125 (FIGURA 5B e TABELA 6).

Tabela 6 - Valores médios de taxa transpiratória (E -  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), eficiência do uso da água (WUE- A/E), índice de clorofilas a, b e total (clA, clB e clT - ICF), área do xilema (ax -  $\mu\text{m}^2$ ), número de vasos de xilema (nvx), frequência dos vasos do xilema (fvx), diâmetro dos vasos do xilema (dvx -  $\mu\text{m}$ ), área do floema (af -  $\mu\text{m}^2$ ), índice de vulnerabilidade (iv) e condutividade hidráulica relativa (chr -  $\mu\text{m}^4 10^6$ ) de diferentes clones de *Coffea canephora* antes do período de suspensão da irrigação (APSI). 2017.

Clone	E		WUE		clA		clB		clT		ax	
14	0,8843	c	7,74	a	447,58	a	227,81	b	665,31	b	125996	d
22	1,4199	a	5,09	c	438,58	a	243,31	b	668,15	b	195750	a
8	1,1382	b	5,54	b	429,5	a	269,03	a	734,8	a	167966	b
125	0,7675	c	5,98	b	389,5	b	168,21	c	543,91	c	193163	a
114	1,5673	a	4,74	c	450,42	a	289,51	a	731,81	a	144920	c
30	1,3171	a	4,15	c	446,5	a	281,42	a	727,92	a	129003	d
Clone	nvx		fvx		dvx		af		iv		chr	
14	110,17	d	877,18	c	17,5	b	82130,46	b	0,020	c	5,25	a
22	128,83	c	660,08	d	19,96	a	101786,60	a	0,030	a	6,6	a
8	114,5	d	684,65	d	19,1	a	80269,93	b	0,028	a	5,98	a
125	161,33	a	835,76	c	18,93	a	85129,93	b	0,023	b	6,88	a
114	140	b	967,74	b	16,72	b	85281,07	b	0,017	d	4,8	a
30	134,5	b	1044,53	a	16,54	b	71533,68	c	0,016	d	4,9	a

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.

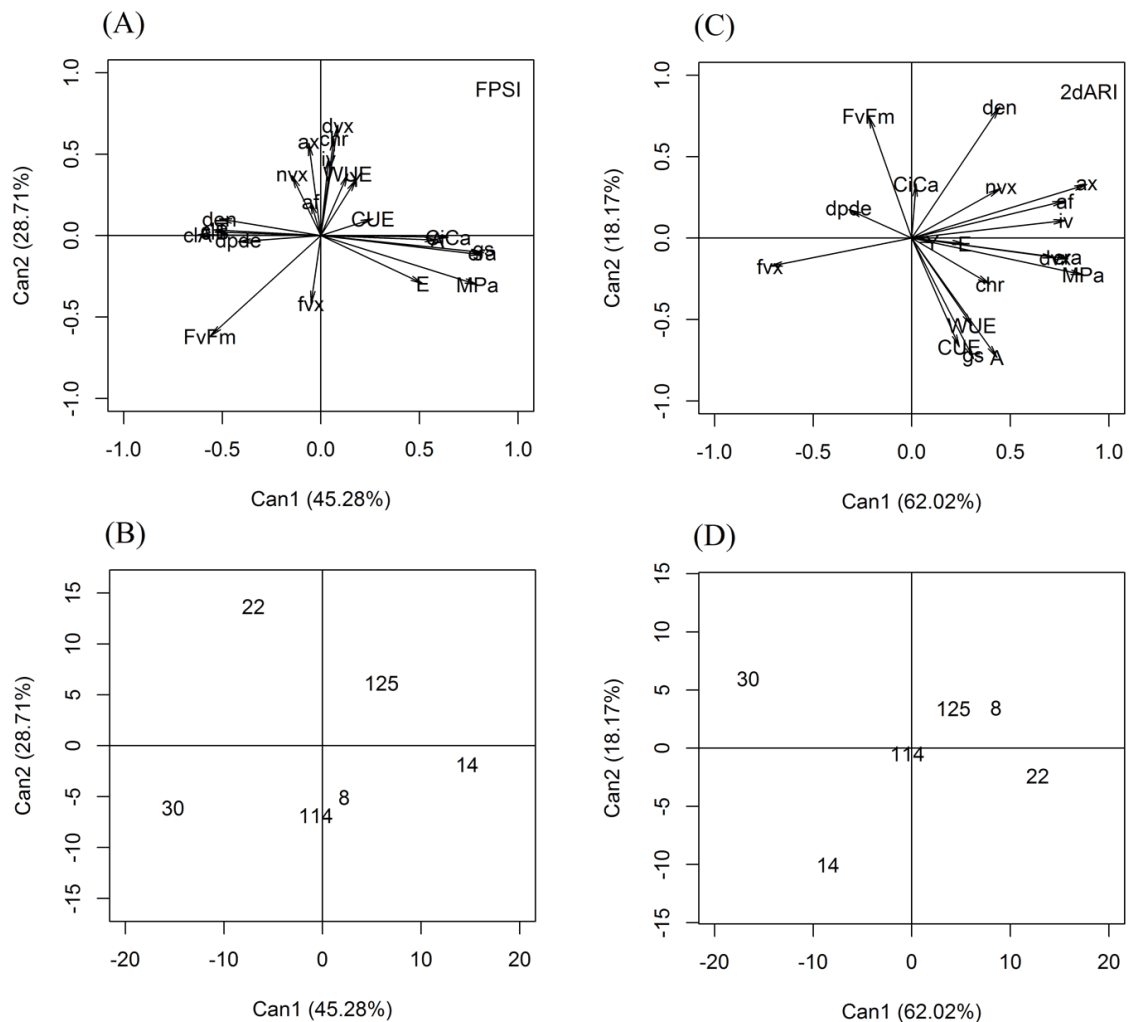
Fonte: Da autora (2020).

A aproximação dos clones 22 e 8, se deu pelo maior valor médio de índice de vulnerabilidade (iv) e menor valor de frequência dos vasos (fvx), entretanto, o clone 22 se destacou por maior valor de área total do floema (af) (FIGURA 5B e TABELA 6). Já o clone 14 apresentou maior valor de eficiência do uso da água (WUE), o que contribuiu para sua dispersão.

Os clones 30 e 114 apresentaram uma aproximação na dispersão gráfica, pelo menor valor de índice de vulnerabilidade (iv). Todavia, o clone 30 se destacou por apresentar maior valor médio de frequência dos vasos do xilema (fvx) (FIGURA 5B, TABELA 6).

Ao final do período de suspensão da irrigação (FPSI), as duas primeiras variáveis canônicas explicaram aproximadamente 74% da variabilidade dos dados (FIGURA 6).

Figura 6 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, no final do período de suspensão da irrigação (FPSI – A e B) e dois dias após o retorno da irrigação (2dARI – C e D). (A e C) Os coeficientes de correlação para as características foram representadas pelo vetor. (B e D) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2017.



Fonte: Da autora (2020).

Para a canônica 1, a qual explica a maior parte da variabilidade (45,28%), a taxa fotossintética líquida (A), transpiratória (E), condutância estomática (gs), relação

concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), conteúdo relativo de água (cra) e potencial hídrico foliar (MPa), apresentaram maior contribuição positiva (FIGURA 6A). Já as características eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm), índices de clorofila a, b e total e a variável anatômica densidade estomática (den) (FIGURA 6A), contribuíram negativamente.

Já para a segunda canônica, que explicou 28,71% da variabilidade dos dados, apresentou as características anatômicas área total dos vasos do xilema (ax), diâmetro de vasos de xilema (dvx), índice de vulnerabilidade (iv) e condutividade hidráulica relativa (chr) apresentaram maior contribuição positiva para essa dispersão, enquanto que a variável fisiológica FvFm negativa (FIGURA 6A).

Maiores valores médios de diâmetro dos vasos do xilema (dvx) e condutividade hidráulica relativa (chr), contribuíram para a dispersão do clone 22. Já os menores valores médios de conteúdo relativo de água (cra) e condutância estomática (gs), bem como maior valor de eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm), contribuíram para o isolamento do clone 30.

A proximidade dos clones 125 e 14 foi observada pelo maior valor médio de relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), contudo, o clone 14 se destacou por apresentar maiores valores de taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), bem como menores valores de eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm), índices de clorofila a, b e Total (clA, clB e clT) e densidade estomática (den) (FIGURA 6B e TABELA 7).



Tabela 7 – Valores médios de taxa fotossintética líquida (A -  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), taxa transpiratória (E -  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e condutância estomática (gs -  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), relação concentração intercelular de  $\text{CO}_2$  no mesofilo/concentração de  $\text{CO}_2$  externa atual (CiCa), conteúdo relativo de água (cra - %), potencial hídrico antemanhã foliar (MPa), eficiência quântica potencial do PSII (FvFm), índice de clorofilas a, b e total (clA, clB, clT - ICF), densidade estomática ( $\text{NE/mm}^2$ ), área do xilema (ax -  $\mu\text{m}^2$ ), diâmetro de vasos de xilema (dvx -  $\mu\text{m}$ ), índice de vulnerabilidade (iv) e condutividade hidráulica relativa (chr -  $\mu\text{m}^4 10^6$ ) de diferentes clones de *Coffea canephora* no final do período de suspensão da irrigação (FPSI). 2017.

Clone	A	E	gs	CiCa	cra	Mpa	FvFm	clA
14	5,22 a	0,8 a	0,04 a	0,43 a	81,14 b	-1,01 b	0,65 d	354,95 b
22	3,32 b	0,51 b	0,02 b	0,3 c	60,54 c	-2,54 c	0,69 c	418,58 a
8	2,97 b	0,77 a	0,02 b	0,39 b	88,03 a	-0,97 b	0,82 a	416,05 a
125	2,47 c	0,87 a	0,02 b	0,46 a	82,9 b	-0,75 a	0,7 c	396,5 a
114	3,46 b	0,91 a	0,02 b	0,33 c	79,57 b	-0,8 a	0,79 b	415,17 a
30	2,24 c	0,56 b	0,01 c	0,33 c	45,85 d	-2,64 c	0,81 a	420,17 a
Clone	clB	clT	den	ax	dvx	iv	chr	
14	134,54 b	491,82 b	122,68 d	113654 c	16,75 c	0,02 c	4,5 b	
22	218,92 a	610,43 a	275,84 b	194246 a	19,13 a	0,03 a	5,77 a	
8	219,69 a	573,42 a	338,3 a	189274 a	17,97 b	0,03 a	3,94 b	
125	227,19 a	611,64 a	276,58 b	185688 a	17,4 b	0,02 b	4,5 b	
114	249,05 a	641,93 a	225,28 c	148668 b	15,85 d	0,02 c	3,77 b	
30	256,11 a	625,5 a	274,35 b	122084 c	15,67 d	0,02 c	3,56 b	

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.  
Fonte: Da autora (2020).

O clone 114, apesar de uma dispersão intermediária, apresentou altos valores médios de taxa transpiratória, potencial hídrico foliar, índices de clorofila a, e total. Já o clone 8, foi observado que os maiores valores médios de conteúdo relativo de água, e densidade estomática, contribuíram para a sua dispersão.

Dois dias após o retorno da irrigação (2dARI), as duas primeiras canônicas explicaram 80,19% da variabilidade total dos dados (FIGURA 6). A primeira canônica (66,02%), apresentou as características área do xilema (ax), potencial hídrico foliar (MPa), conteúdo relativo de água (cra), índice de vulnerabilidade (iv), área do floema (af) e diâmetro de vasos do xilema (dvx), positivamente relacionadas, enquanto que a frequência dos vasos do xilema (fvx) negativamente (FIGURA 6A).

Na segunda canônica, que explica 18,17% da variação dos dados, apresentou positivamente relacionadas à eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm) e

densidade estomática (den), já a condutância estomática (gs), taxa fotossintética líquida (A), eficiência de carboxilação (CUE) e eficiência do uso da água (WUE) foram negativamente (FIGURA 6A).

Assim como FPSI, o clone 114 apresentou uma dispersão intermediária, apesar disso, observou-se altos valores médios de conteúdo relativo de água (cra), eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm) e frequência dos vasos do xilema (fvx) (FIGURA 6D e TABELA 8).

Tabela 8 - Valores médios de fotossíntese (A -  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática (gs -  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), eficiência do uso da água (WUE - A/E) eficiência de carboxilação (CUE - A/Ci), conteúdo relativo de água (cra - %), potencial hídrico antemanhã (MPa), eficiência quântica potencial do fotossistema II (FvFm), densidade estomática ( $\text{mm}^2$ ), área do floema (af -  $\mu\text{m}^2$ ), área do xilema (ax -  $\mu\text{m}^2$ ), frequência de vasos de xilema (fvx), diâmetro de vasos de xilema (dvx) e índice de vulnerabilidade (iv) de diferentes clones de *Coffea canephora* dois dias após o retorno da irrigação (2dARI). 2017.

Clone	A	gs	WUE	CUE	cra	MPa	FvFm
14	4,82 b	0,04 a	5,21 b	0,04 b	79,81 b	-0,71 c	0,69 c
22	5,74 a	0,03 a	7,76 a	0,05 a	85,73 a	-0,48 b	0,69 c
8	3,35 d	0,03 b	2,92 c	0,01 c	85,31 a	-0,31 a	0,75 b
125	3,02 e	0,02 c	3,18 c	0,02 c	85,25 a	-0,53 b	0,79 a
114	3,92 c	0,03 b	3,7 c	0,02 c	84,36 a	-0,59 b	0,78 a
30	2,49 e	0,02 c	3,52 c	0,02 c	72,54 c	-1,34 d	0,78 a

clone	den	af	ax	fvx	dvx	iv
14	122,68 d	69781,8 c	113654 c	897,16 a	16,75 c	0,02 c
22	275,84 b	90324 a	194246 a	682,51 c	19,13 a	0,03 a
8	338,3 a	95214,3 a	189274 a	596,46 c	17,97 b	0,03 a
125	276,58 b	82656,9 b	185688 a	773,21 b	17,4 b	0,02 b
114	225,28 c	87872 b	148668 b	953,74 a	15,85 d	0,02 c
30	274,35 b	70383,5 c	122084 c	928,49 a	15,67 d	0,02 c

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.

Fonte: Da autora (2020).

Foi observada a proximidade dos clones 125, 8 e 22, por apresentarem maior valor médio de área total dos vasos do xilema (ax). Entretanto, o clone 22 se destacou maiores valores médios de eficiência de carboxilação (CUE), eficiência do uso da água (WUE), taxa fotossintética líquida (A) e diâmetro dos vasos do xilema (dvx) (FIGURA 6D e TABELA 8).

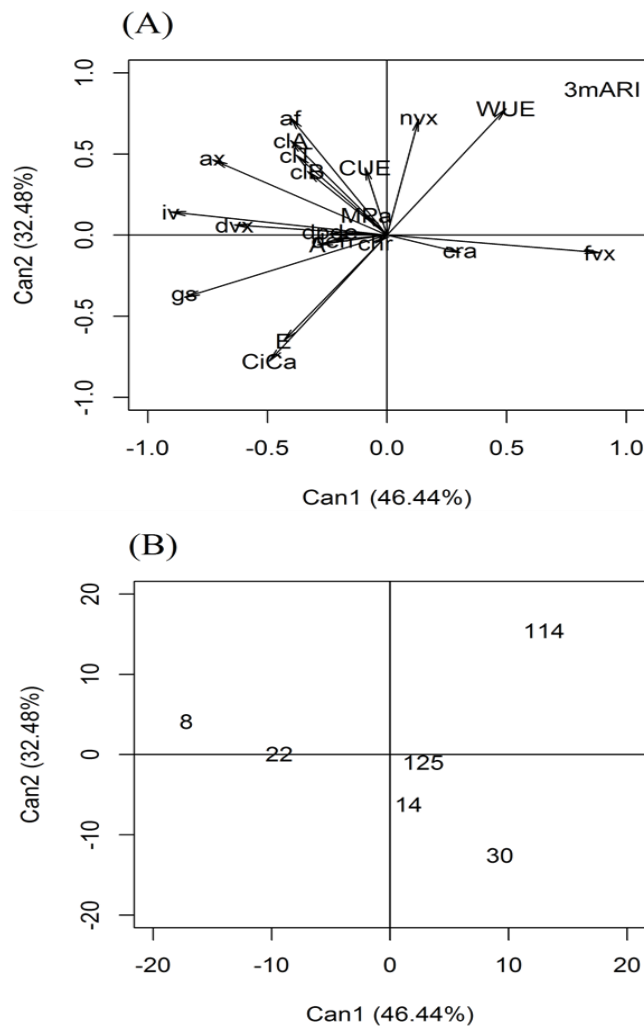
O clone 8 apresentou maiores valores médios de potencial hídrico foliar (MPa) e densidade estomática (den), contribuindo assim para sua dispersão. A dispersão isolada do

clone 30 se deve aos menores valores médios de conteúdo relativo de água (cra) e potencial hídrico foliar (MPa).

Já o clone 14 apresentou menores valores médios para as variáveis analisadas, exceto para frequência dos vasos do xilema (fvx) e condutância estomática (gs) (FIGURA 6D e TABELA 8).

Aos três meses após o retorno da irrigação (3mARI), as duas primeiras variáveis canônicas explicaram 78,92% da variabilidade dos dados (FIGURA 7).

Figura 7 - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de variáveis canônicas dos seis clones de *Coffea canephora* estudados em função das características fisiológicas e anatômicas avaliadas, três meses após o retorno da irrigação. (A) Os coeficientes de correlação para todas as características foram representadas pelo vetor. (B) A segregação dos seis clones de *Coffea canephora* estudados, baseada nas características avaliadas para o ano de 2017.



Fonte: Da autora (2020).

A primeira canônica que explicou 46,44% apresentou a eficiência do uso da água (WUE) e frequência dos vasos do xilema (fvx) com maior peso positivo, enquanto que negativo foi a condutância estomática (gs), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), área do xilema (ax), índice de vulnerabilidade (iv) e diâmetro dos vasos do xilema (dvx) (FIGURA 7).

Já para a segunda canônica (32,48%), a eficiência do uso da água (WUE), índices de clorofilas A e total (clA e clT), área do floema (af) e número dos vasos do xilema (nvx), foram negativamente relacionadas, enquanto que a taxa transpiratória (E) e relação CiCa foram negativamente relacionadas (FIGURA 7).

Diferentemente dos períodos FPSI e 2dARI, em 3AMRI o clone 14 se destacou por maior valor médio de eficiência do uso da água (WUE), bem como menor taxa transpiratória (E), condutância estomática (gs) e relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa) (FIGURA 7B e TABELA 9).

Tabela 9 - Valores médios de transpiração (E - mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), condutância estomática (gs - mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), relação concentração intercelular de CO<sub>2</sub> no mesofilo/concentração de CO<sub>2</sub> externa atual (CiCa), eficiência do uso da água (CUE – A/E), índice das clorofilas a e total (clA, clT – ICF), área do floema (af - μm<sup>2</sup>), área do xilema (ax - μm<sup>2</sup>), número de vasos de xilema (nvx), diâmetro dos vasos do xilema (dvx - μm), frequência de vasos do xilema (fvx) e índice de vulnerabilidade (iv) de diferentes clones de *Coffea canephora* três meses após o retorno da irrigação (3mARI). 2017.

Clone	E	gs	CiCa	WUE	clA	clT	af	ax	nvx	dvx	fvx	iv
14	1,46	d	0,14	c	0,69	a	6,38	c	413,67	a	622,33	b
22	1,78	c	0,23	a	0,69	a	7,33	b	426	a	683	a
8	2,23	b	0,21	b	0,68	a	4,7	d	412,83	a	619	b
125	1,41	d	0,12	d	0,63	a	7,61	b	392,83	b	583,17	c
114	0,85	e	0,05	e	0,4	b	11,99	a	417,33	a	636,83	b
30	2,47	a	0,15	c	0,71	a	4,45	d	368,16	c	537,5	d

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na VERTICAL constituem grupo estatisticamente homogêneo.

Fonte: da autora (2020).

A proximidade na dispersão gráfica observada para os clones 8 e 22 se deve ao maior valor médio de diâmetro dos vasos do xilema (dvx), entretanto, o clone 8 se destaca pelos maiores valores médios de área total do xilema (ax) e índice de vulnerabilidade (iv).

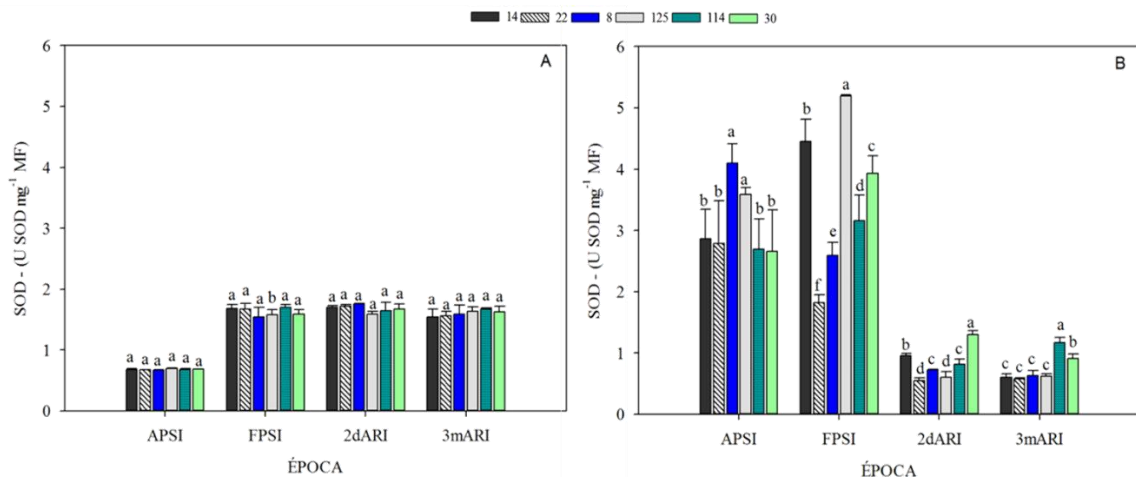
As características que mais contribuíram para a dispersão próxima dos clones 14 e 30, foram os menores valores médios de área total do floema (af), área total do xilema (ax) e número de vasos do xilema (nvx), ressaltando que o clone 30 apresentou maior valor de taxa transpiratória (E) e menores valores médios de índices de clorofila A e total (clA e clT) (FIGURA 7 e TABELA 9), favorecendo dispersão mais isolada dos demais.

## 4.2 Características bioquímicas

Os clones avaliados, de acordo com os resultados, acionaram o sistema de defesa antioxidante frente ao déficit hídrico imposto.

A atividade da superóxido dismutase (SOD), não apresentou diferença estatística em seus níveis nos períodos avaliados para o ano de 2016, mas é visível a menor atividade da mesma antes do período de suspensão da irrigação (APSI) (FIGURA 8A). Para o ano de 2017, os clones 8 e 125 apresentaram maior atividade da SOD em APSI, sendo que o último se manteve com alta atividade no final do período da suspensão da irrigação (FPSI) (FIGURA 8B).

Figura 8 - Atividade da superóxido dismutase (SOD – U SOD mg<sup>-1</sup> MF), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



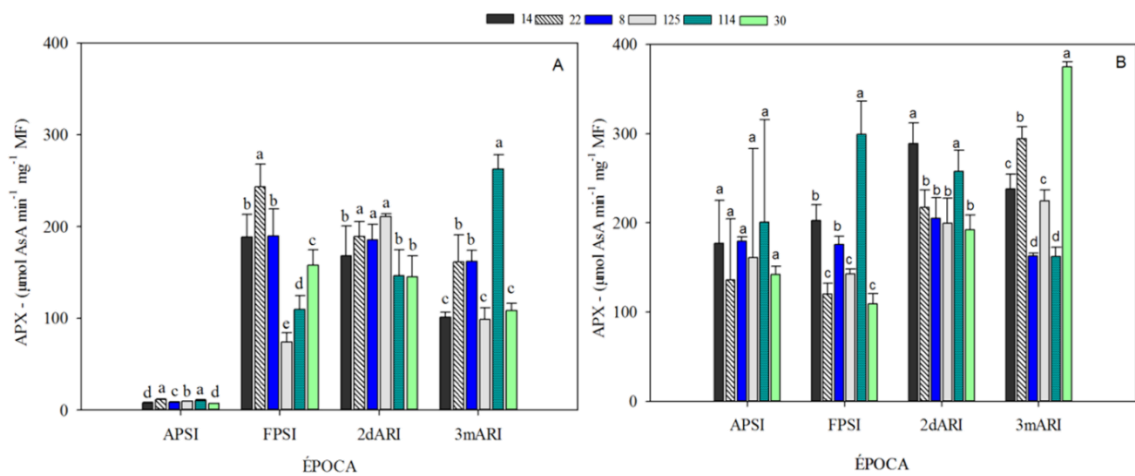
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

Fonte: Da autora (2020).

Já para os períodos 2dARI e 3mARI do ano de 2017, a atividade da SOD foi visivelmente menor em relação aos outros períodos e, os clones 30 e 114 apresentaram maiores valores médios, respectivamente (FIGURA 8B). Ressalta-se que, de 2016 pra 2017, observa-se um aumento na atividade da SOD para os períodos APSI e FPSI, e o contrário ocorre em 2dARI e 3mARI (FIGURA 8), para os clones avaliados.

A atividade da ascorbato peroxidase (FIGURA 9) apresentou variação entre os períodos avaliados, sendo que em 2016 para APSI o maior valor encontrado foi para os clones 114 e 22, já para FPSI alta atividade foi observada no clone 22, enquanto que o clone 125 foi o que apresentou menor valor de atividade da APX nesse período (FIGURA 9A).

Figura 9 - Atividade da ascorbato peroxidase (APX -  $\mu\text{mol AsA min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

Fonte: Da autora (2020).

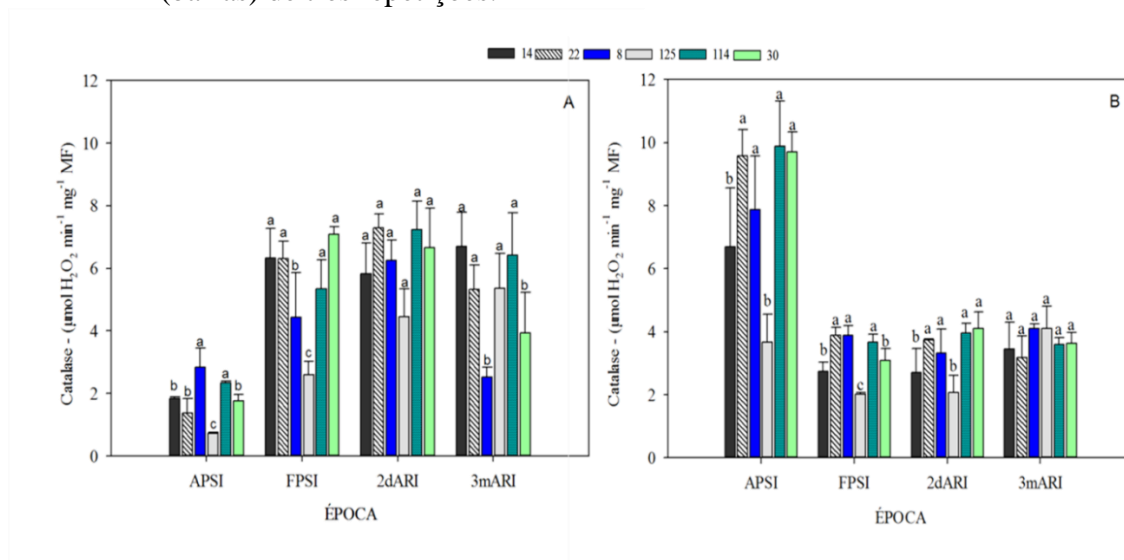
Dois dias após o retorno da irrigação (2dARI), os clones 22, 8 e 125 apresentaram maior atividade da APX em relação aos demais, diminuindo aos três meses após o retorno da irrigação (3mARI), período em que apenas o clone 114 apresentou maior valor (FIGURA 9A).

Já para o ano de 2017, houve grande variação no comportamento dos clones avaliados, em APSI a atividade da APX foi igual para todos os clones (FIGURA 9B), sendo que em FPSI apenas o 114 aumentou a atividade desta enzima. Dois dias após o retorno da

irrigação (2dARI), os clones 14 e 114 apresentaram maior atividade da APX, e 3mARI apenas o clone 30 aumentou sua atividade (FIGURA 9B).

Para a atividade da enzima catalase (CAT), foi observado no ano de 2016, que antes do período de suspensão da irrigação (APSI), os clones 8 e 114 apresentaram maiores valores. Destaca-se que, de maneira geral, o clone 114 manteve as mais altas atividades da CAT em todos os períodos de avaliação para este ano. No FPSI menores atividades de CAT foram observadas para os clones 125 e 8. Dois dias após o retorno da irrigação (2dARI), a atividade da CAT apresentou estabilidade entre os clones, não havendo diferença entre eles. Já aos 3mARI os clones 8 e 30 apresentaram os menores valores da atividade de CAT (FIGURA 10A).

Figura 10 - Atividade da catalase (CAT -  $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

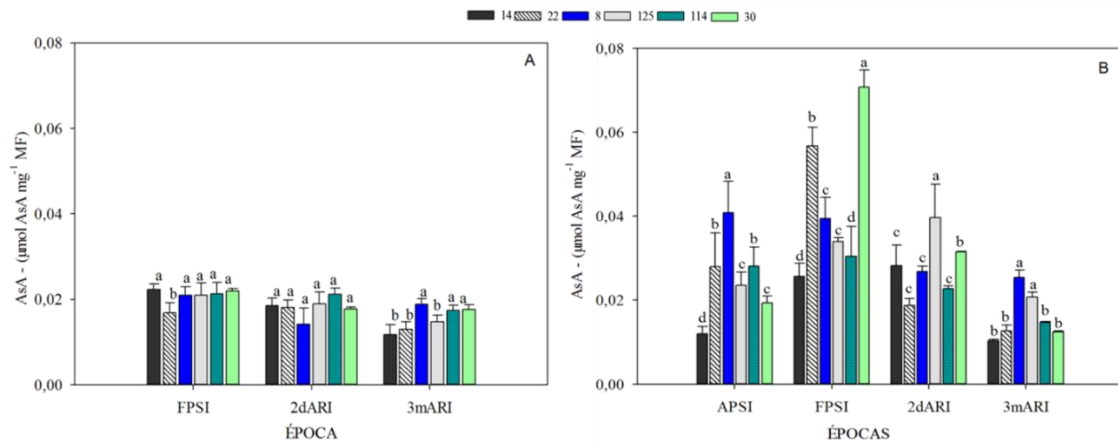
Fonte: Da autora (2020).

Para o ano de 2017, os clones 14 e 125 apresentaram a menor atividade da CAT para APSI, FPSI e 2dARI, ressaltando-se que o clone 30 também apresentou menor atividade no final do período de suspensão da irrigação (FPSI). Já três meses após o retorno da irrigação (3mARI) não foi observada diferença na atividade da CAT entre os clones avaliados (FIGURA 10B). É interessante observar que houve uma diminuição na atividade da catalase de 2016 para 2017, em FPSI, 2dARI e 3mARI. O inverso foi observado em APSI (FIGURA 10).

Para os níveis de ascorbato, metabólito que participa do mecanismo de defesa antioxidante não enzimático, foi observado em 2016 uma estabilidade de seus níveis em FPSI e 2dARI, salientando-se que apenas o clone 22 apresentou menor nível em FPSI. Já em 3mARI, os clones 14, 22 e 125 apresentaram os mais baixos níveis de ascorbato em comparação aos demais clones (FIGURA 11A).



Figura 11 - Níveis de ascorbato (AsA -  $\mu\text{mol AsA mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



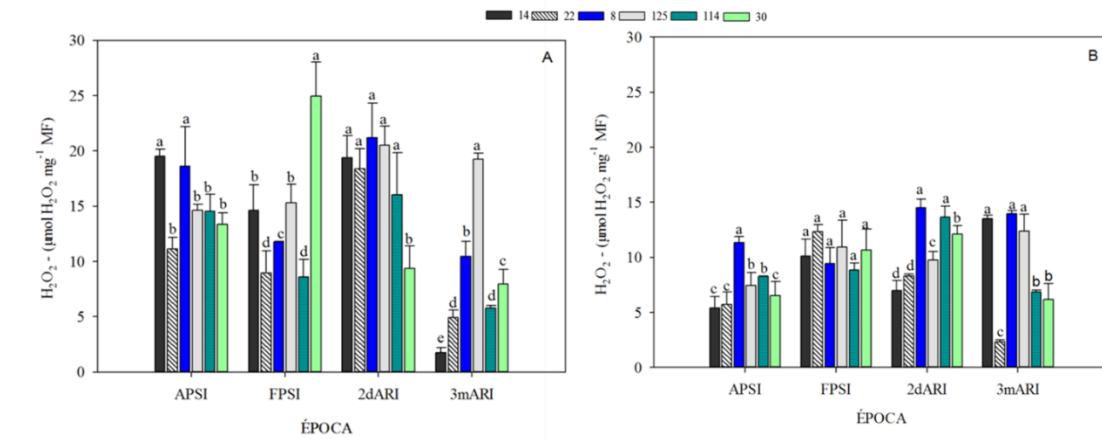
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

Fonte: Da autora (2020).

Diferentemente, em 2017 houve maior variação nos níveis de ascorbato para os períodos avaliados, visto que antes do período de suspensão da irrigação (APSI) e três meses após o retorno da irrigação (3mARI), o clone 8 apresentou maiores níveis de ascorbato, bem como o clone 125 para 3mARI (FIGURA 11B). No final do período de suspensão da irrigação (FPSI), o clone 30 apresentou maior nível de ascorbato e 2dARI o clone 125 apresentou maiores níveis (FIGURA 11B).

Para os níveis de peróxido ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), foi observado aumento para o ano de 2016 (FIGURA 12A) em relação ao ano de 2017 (FIGURA 12B). No ano de 2016, em APSI os clones 14 e 8 apresentavam valores mais elevados, já em FPSI apenas o clone 30 apresentou maiores níveis de peróxido de hidrogênio. Já dois dias após o retorno da irrigação, diferentemente de FPSI, o clone 30 apresentou os menores valores quando comparado aos demais clones. Três meses após o retorno da irrigação, foi observado os maiores níveis de  $\text{H}_2\text{O}_2$  no clone 125, enquanto que o clone 14 apresentou menor valor (FIGURA 12A).

Figura 12- Níveis de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$  -  $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



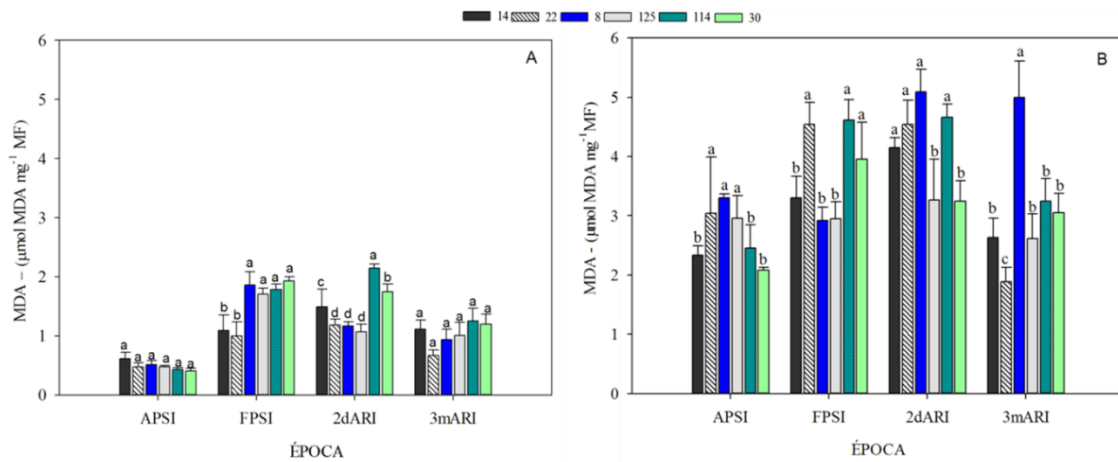
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

Fonte: Da autora (2020).

Avaliando-se os níveis de peróxido de hidrogênio no ano de 2017, observa-se que o clone 8 apresentou maiores valores médios em todas as períodos de avaliação, ressaltando-se que em 2dARI, o clone 114 também apresentou níveis altos de peróxido, e três meses após o retorno da irrigação, os maiores níveis foram observados adicionalmente nos clones 14 e 125 (FIGURA 12B).

Para os níveis de MDA, foi observado que em 2016 em APSI e 3mARI, não houve diferença entre os clones analisados, já em FPSI, os clones 14 e 22 apresentaram os menores níveis de MDA, mantendo-se assim dois dias após o retorno da irrigação, sendo que neste período apenas o clone 114 apresentou os maiores níveis (FIGURA 13A).

Figura 13 - Níveis de malondialdeído (MDA -  $\mu\text{mol MDA mg}^{-1}\text{MF}$ ), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



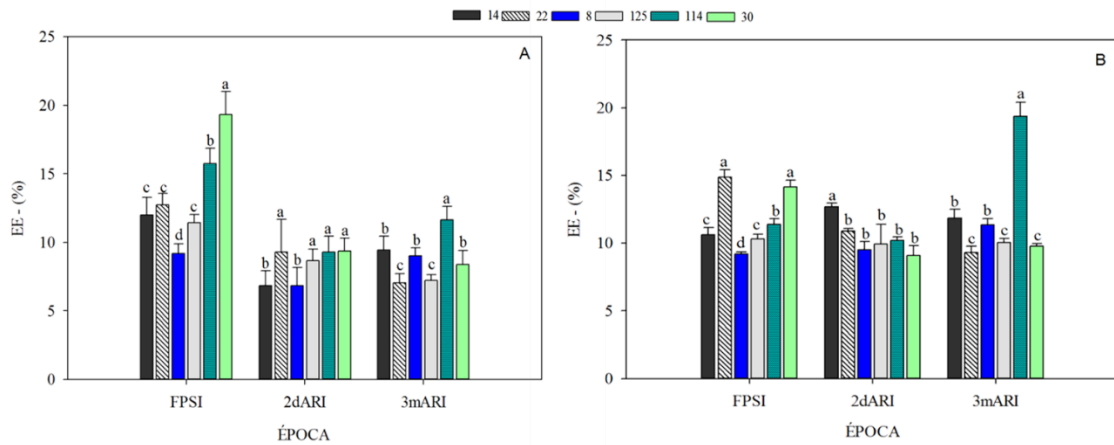
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

Fonte: Da autora (2020).

Em 2017, observa-se grande variação nos níveis de MDA em todos os períodos avaliados, sendo que antes do período de suspensão da irrigação (APSI), os clones 22, 8 e 125 apresentaram maiores valores médios (FIGURA 13B). Já em FPSI, além do clone 22, os clones 114 e 30 apresentaram maiores níveis de malondialdeído, ressaltando-se que os clones 125 e 30 apresentaram valores baixos dois dias após o retorno da irrigação (FIGURA 13B). Em 3mARI, o clone 8 manteve seus níveis de MDA mais altos em relação aos demais clones.

Para a quantificação do extravasamento de eletrólitos (EE) no ano de 2016 foi observado que em FPSI, o clone 30 apresentou maior extravasamento, enquanto que o clone 8 apresentou menor EE (FIGURA 14A). Já 2dARI, o clone 8 se manteve com baixo extravasamento, bem como o clone 14, e 3mARI o clone 114 apresentou maior extravasamento de eletrólitos (FIGURA 14A).

Figura 14 – Extravasamento de eletrólitos (EE- %), antes (APSI) e no final (FPSI) do período de suspensão da irrigação, dois dias (2dARI) e três meses (3mARI) após o retorno da irrigação, nos anos de 2016 (A) e 2017 (B), em seis clones de *Coffea canephora*. Os dados são exibidos com desvio padrão médio (barras) de três repetições.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente.

Fonte: Da autora (2020).

Já para o ano de 2017, os clones 30 e 22 apresentaram maior extravasamento de eletrólitos em FPSI (FIGURA 14B). Já em 2dARI, maiores valores de EE foram observados para o clone 14 e o clone 114 apresentou os maiores valores de EE três meses após o retorno da irrigação (3mARI) (FIGURA 14B).

Diante dos resultados apresentados, observou-se que os clones apresentaram diferentes mecanismos para melhor adaptação em condições de cultivo com suspensão da irrigação.

## 5 DISCUSSÃO

A deficiência hídrica é um dos fatores limitantes e de maior impacto ao crescimento e produção de diferentes espécies de plantas, acarretando na perda da turgescência celular imediata (ALTER *et al.*, 2015; DOMINGHETTI *et al.*, 2016), prejudicando produtividade e qualidade do produto final (RODRIGUES *et al.*, 2018).

O cafeeiro demonstra ser uma cultura que apresenta plasticidade fenotípica em condições ambientais diversas de cultivo (BALIZA *et al.*, 2012; CAVATTE *et al.*, 2012; MARTINS *et al.*, 2019; RODRIGUES *et al.*, 2018), ou seja, possui capacidade de apresentar modificações morfológicas e/ou fisiológicas, podendo ser reversíveis, como resposta a variações ambientais (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A folha, dentre as estruturas que compõem a planta, é considerada uma das mais plásticas e modificam-se em condições ambientais adversas (VICHATO *et al.*, 2006; (ZOKAEE-KHOSROSHAHI *et al.*, 2014), pois é onde estão presentes os estômatos, responsáveis pelas trocas gasosas.

Neste trabalho, é possível inferir que em condições de déficit hídrico imposto, os clones avaliados tenderam a direcionar seus recursos para mecanismos voltados à sua sobrevivência, apresentando anatômicas, fisiológicas e bioquímicas, que possibilitaram na distinção e diferenciação dos mesmos.

Esse fato pode ter sido justificado pelas condições climáticas no período de suspensão da irrigação, apresentando temperaturas máximas (28,5 °C) e mínimas (13,3 °C), baixa precipitação média (0,07 mm) e umidade relativa média (52,2%), alta incidência de radiação solar média (18,9) (FIGURA 1) (BUNN *et al.*, 2015; BALIZA *et al.*, 2012; BATISTA *et al.*, 2010; CASTANHEIRA *et al.*, 2016; CRAPARO *et al.*, 2015; GRISI *et al.*, 2008; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

A deficiência hídrica pode afetar as trocas gasosas nas plantas (FAVARETTO *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2010) e, uma estratégia que as mesmas utilizam para sobreviver a tal condição, é mantendo os estômatos fechados visando diminuir a perda de água via transpiração, mesmo que isso ocasione diminuição ou bloqueio simultâneo na captação de CO<sub>2</sub> influenciando negativamente a fotossíntese (SEVANTO *et al.*, 2018).

O clone 14 apresentou maiores valores médios de trocas gasosas no período FPSI (2016) e os clones 8 e 125 em 2017 no mesmo período. Ressalta-se que os clones 30 e 22, apresentaram os valores mais baixos de trocas gasosas neste período nos dois anos de

avaliação. A cultura do café apresenta fotossíntese em torno de 4 a 11  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (DAMATTA *et al.*, 2004; GHINI *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2004).

Os baixos valores de taxa fotossintética líquida (A) observados no presente trabalho pode ter sido resultado do fechamento dos estômatos dado pelos menores valores médios de condutância estomática (gs), para economizar água diminuindo a transpiração e consequentemente o influxo de  $\text{CO}_2$  (JACINTO JÚNIOR *et al.*, 2019).

O gerenciamento eficiente da perda de água da planta enquanto absorve o  $\text{CO}_2$  suficiente para a realização da fotossíntese, determina a eficiência do uso da água (WUE) (REIS *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2010) e, permite observar como está ocorrendo o controle estomático durante o processo metabólico (MANALAVAN *et al.*, 2009).

Esta característica se apresentou importante na maioria dos períodos avaliados, exceto FPSI (2017) e 3mARI (2016). Foi observado em APSI, 2016 e 2017, como os clones estavam em relação a eficiência do uso da água, os clones 22, 114 e 30 apresentaram os menores valores médios, enquanto que os 14 maiores valores. Em FPSI (2016), o clone 14 continuou com maior eficiência no uso da água, enquanto que o 30 permaneceu menor. Plantas que mantêm maior eficiência do uso da água (WUE) podem diminuir os danos causados pelo estresse hídrico e serem potenciais para cultivo em diversas condições ambientais (FERRÃO *et al.*, 2018; FERRAZ *et al.*, 2012).

O fechamento estomático provocado pelo déficit hídrico, além de diminuir as trocas gasosas, reduz o potencial hídrico das folhas (FERRARI *et al.*, 2015). Foi observado que além de menores valores de trocas gasosas, os clones 22 e 30 apresentaram valores mais baixos de potencial hídrico foliar no período de déficit hídrico, nos dois anos de avaliação.

O potencial hídrico representa a energia livre da água e tem sido utilizado por diversos estudos para avaliar o estado hídrico das plantas (BATISTA *et al.*, 2010; MARRACCINI *et al.*, 2011; PINHEIRO *et al.*, 2005; PRAXEDES *et al.*, 2006), considerado um parâmetro importante na distinção de clones de café em condições de deficiência hídrica (PINHEIRO *et al.*, 2004; MARRACCINI *et al.*, 2011).

No presente trabalho, o potencial hídrico se destacou apenas nos períodos FPSI e 2dARI nos dois anos de avaliação, o clone 8 apresentou os maiores valores, salientando-se que maiores valores também foram observados para o clone 125 em FPSI 2016 e para o clone 114 em FPSI 2017. Interessante observar que o clone 14 apresentou valores intermediários de potencial hídrico para estes períodos nos dois anos de avaliação.

Mesmo diante menores valores de potencial hídrico e trocas gasosas, foi observado que os clones 22 e 30 apresentaram uma rápida recuperação dois dias após o retorno da

irrigação, cerca de 80% e 60%. Plantas de apresentam uma maior capacidade do sistema hidráulico sob déficit hídrico, são capazes de se recuperarem mais rapidamente retorno seu potencial hídrico maior (PINHEIRO *et al.*, 2005; DUBBESTEIN *et al.*, 2020).

De acordo com alguns estudos, o conteúdo relativo de água (CRA) também pode ser utilizado como indicador de plantas tolerantes ao déficit hídrico (SILVA *et al.*, 2014; CANAVAR *et al.*, 2014). Esta característica foi de grande importância no período FPSI (2016 e 2017), visto que foi observado que os clones 22 e 30 apresentaram os menores, em torno de 40% e 60%, respectivamente, já o clone 8 apresentou maior CRA, aproximadamente 80%. Os clones 14, 125 e 124, apresentaram valores intermediários, principalmente em 2017, em que assemelharam ao clone 8.

Este resultado implica que o déficit hídrico imposto pode ter provocado danos, prejudicando os processos vitais de crescimento celular aos clones 22 e 30. O aumento do extravasamento de eletrólitos observado, principalmente no FPSI em 2017 para estes clones, é um indicativo de danos às membranas celulares.

Resultados similares foram encontrados por Peloso *et al.* (2017), em que o estresse hídrico diminuiu o conteúdo relativo de água e aumentou significativamente o extravasamento de eletrólitos em folhas de mudas de *Coffea arabica*. Danos causados às membranas celulares pelo déficit hídrico, leva ao extravasamento de eletrólitos Langaro (2014), os resultados do presente estudo indicam que os clones 22 e 30 são mais sensíveis ao estresse hídrico.

A eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), também pode ser utilizada para comparar plantas em condições de déficit hídrico (CINTRA *et al.*, 2020; PELOSO *et al.*, 2017; ROLFE; SCHOLE, 2010; ROUSSEAU *et al.*, 2013). De acordo com Reis e Campostrini (2011), plantas sem condições estressantes, apresentam valores de Fv/Fm entre 0,75 e 0,85, indicando que abaixo disso as mesmas podem estar com a capacidade fotossintética reduzida.

Foi observado no presente estudo que, no FPSI e 2dARI de 2017, os clones 14 e 22 apresentaram baixos rendimentos quânticos (Fv/FM), em torno de 0,70, ressaltando-se que esta característica não foi importante em 2016. Corroborando com os resultados apresentados, autores observaram menores valores de Fv/Fm em plantas submetidas ao estresse hídrico (CINTRA *et al.*, 2020), e após reidratação (DUBBERSTEIN *et al.*, 2020).

Os resultados acerca da eficiência quântica potencial do fotossistema II (Fv/Fm), pode ter sido influenciado porque em 2017 houve maior incidência de radiação (Figura 1), visto que o aumento de luz pode ocasionar a fotoinibição nas plantas (ARAÚJO; DEMINICIS, 2009). Importante destacar que, mesmo apresentando potencial hídrico menor, o clone 30

manteve seu aparato fotossintético intacto, pois apresentou maiores valores de FvFm e índices de clorofilas no período FPSI.

Estes resultados indicam que a diminuição da taxa fotossintética líquida (A) no clone 30, pode ter sido em razão da menor condutância estomática, causando menor influxo de CO<sub>2</sub>, Peloso *et al.* (2017), também encontraram resultado semelhante em mudas de arábica em submetidas ao déficit hídrico.

As clorofilas estão relacionadas à eficiência fotossintética das plantas, influenciando tanto no crescimento quanto na adaptação das mesmas em diversos ambientes de cultivo (SILVA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2014), apresentando-se como umas das variáveis importantes para avaliar o estado fisiológico das plantas (AMARANTE *et al.*, 2009).

Concomitantemente as modificações fisiológicas, algumas alterações também ocorrem na estrutura interna da planta ou nas folhas, número e densidade de estômatos, bem como feixes vasculares (vasos xilemáticos e floema), entre outras (NASCIMENTO *et al.*, 2006; PINHEIRO *et al.*, 2005), podendo favorecer a sobrevivência da planta em diversas condições ambientais (CONDÉ *et al.*, 2020; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

Outra forma de adaptação das plantas ao déficit hídrico se dá pelo aumento da densidade estomática, muito utilizada na caracterização de plantas em condições ambientais adversas (BATISTA *et al.*, 2010; ERDIANSYAH *et al.*, 2019; FASOLIN *et al.*, 2019; MELO *et al.*, 2014; PINCELLI; SILVA, 2012).

As modificações causadas na densidade estomática podem influenciar a eficiência dos estômatos, afetando assim as trocas gasosas e a eficiência do uso da água (BERTOLINO *et al.*, 2019). A densidade estomática foi uma característica importante nos períodos APSI (2016), FPSI (2016 e 17) e 3mARI (2016), levando-se em conta que as folhas utilizadas para análise em FPSI foram homólogas APSI. Foi observado que houve uma diminuição nos valores médios da densidade estomática (den) de APSI para FPSI, para 2016, exceto para o clone 114 e, nota-se que o clone 30 apresentou os maiores valores médios den para os períodos avaliados.

Uma vez que o maior número de estômatos por área pode favorecer a condutância estomática, visto que os estômatos são responsáveis pela captação de CO<sub>2</sub> para a realização da fotossíntese e transpiração (NÓIA JÚNIOR *et al.*, 2018), resultado contrário foi observado no presente estudo, pois este aumento na den não favoreceu o clone 30, pois apresentou menores valores de trocas gasosas e eficiência do uso da água, implicado que a menor condutância do mesmo prejudicou o influxo de CO<sub>2</sub>.



As modificações no número e tamanho dos estômatos permitem um ajustamento na densidade estomática, em resposta a condições ambientais adversas, afetando diretamente nas trocas gasosas e eficiência do uso da água das plantas (BERTOLINO *et al.*, 2019).

O sistema vascular que é composto por floema e xilema e, é de extrema importância, uma vez que quanto mais eficientes no transporte de seiva, menor o gasto energético a ser provocado na planta (CASTRO *et al.*; 2009).

O floema é responsável pela translocação de fotoassimilados, e o seu maior espessamento pode favorecer o aumento de nutrientes para a planta (PEREIRA *et al.*, 2008). Foi observado no presente estudo que a área total do floema, apresentou diminuição do seu valor médio para maioria dos clones avaliados de APSI para 2dARI, 2017, levando-se em consideração que os dados anatômicos de 2 dias após o retorno da irrigação (2dARI), são os mesmos de FPSI. Portanto, destaca-se que os clones 8 e 114 apresentaram aumento de área do floema em condições de déficit hídrico.

A translocação de fotoassimilados durante períodos de déficit hídrico é fortemente afetado, havendo diminuição (DANNOURA *et al.*, 2019), isso acontece por mudanças na anatomia, desenvolvimento do floema e propriedades do floema (YANN *et al.*, 2019), o que pode ter ocorrido nos clones que apresentaram menor área do floema. Já o aumento de área do floema dos clones 8 e 114 pode ter contribuído para o melhor desenvolvimento dos mesmos.

O xilema é composto por dois tipos vasos lenhosos, os traqueídes (vasos fechados) e elementos de vasos (abertos), em que permite a passagem de água com facilidade (CASTRO *et al.*, 2009) e é responsável pelo transporte de água e sais minerais (HACKE *et al.*, 2017).

Visto isso, algumas plantas apresentam modificações no xilema, como aumento da frequência e/ou diminuição do diâmetro dos vasos, podendo proporcionar maior eficiência em sua função (SILVA *et al.*, 2015).

Em condições de déficit hídrico, a diminuição dos vasos do xilema, pode indicar maior capacidade da planta em manter-se e melhorar o transporte de água, conseqüentemente reduzindo a possibilidade de cavitação pela entrada de ar, evitando assim a morte da planta por embolia (ANDEREGG, 2015; CHOAT *et al.*, 2016; QUEIROZ-VOLTAN *et al.*, 2014).

Foi observado no presente estudo que, características ligadas aos vasos xilemáticos, foram importantes na distinção dos clones em todos os períodos e anos de avaliação, sugerindo a importância do xilema na avaliação de plantas que passam por condição de ambiente de cultivo com déficit hídrico.

De APSI para FPSI, observou-se que as estruturas dos vasos xilemáticos apresentaram diminuição nos seus valores médios, principalmente área total do xilema (2016 e 17) e

diâmetro dos vasos do xilema (2017) e aumento no número de vasos do xilema (2016), características que se repetiram nas duas épocas, levando-se em consideração as folhas serem homólogas de APSI para FPSI. O clone 30 apresentou os menores valores. O clone 30 apresentou os menores valores das características ligadas aos vasos xilemáticos.

Para evitar a cavitação, as plantas apresentam modificações anatômicas, reduzindo o diâmetro dos vasos do xilema, contribuindo no transporte eficiente de água e sais minerais (HACKE *et al.*, 2001; HACKE *et al.*, 2017).

O índice de vulnerabilidade está diretamente ligado ao número e diâmetro dos vasos do xilema, uma vez que quanto maior este índice, mais propensas à cavitação as plantas estão expostas, pois o mesmo permite avaliar o favorecimento ou não de ocorrência de embolia em condições de déficit hídrico e avaliação da eficiência do sistema vascular (CARLQUIST, 1975; CASTRO *et al.*, 2009; RIBEIRO *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2018).

O maior índice de vulnerabilidade (iv) foi observado no clone 22, e os clones 14, 114 e 30 apresentaram menores valores, bem como o clone 8 para APSI/16. Corroborando com os resultados, foi observado em plantas submetidas ao déficit hídrico maior índice de vulnerabilidade (vasos com maior calibre) nas sensíveis e o contrário para as tolerantes (OLIVEIRA *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2012), reforçando que vasos mais largos estão mais propensos a maior vulnerabilidade hidráulica, podendo causar cavitação e embolia (HACKE *et al.*, 2017).

Concomitantemente, está a condutividade hidráulica, uma vez que também está ligada ao tamanho do diâmetro e frequência de vasos do xilema na folha (OLIVEIRA *et al.*, 2018; SPERRY *et al.*, 2006). Ressalta-se que, a maior condutividade hidráulica, é influenciada pelo maior diâmetro dos vasos do xilema, mas isso não garante que a condução de água e sais minerais será eficiente (AMRITPHALE; SHARMA, 2010).

Foi observado que o clone 22 apresentou os maiores valores de condutância hidráulica relativa, estando intermediário apenas para o período 3mARI, já em APSI de 2017, não houve diferença entre os clones avaliados. Maiores diâmetros de vasos do xilema podem contribuir para melhorar a condutância estomática (BORGHETTI *et al.*, 2017), entretanto, o menor diâmetro diminui os riscos de cavitação e embolia em condições de déficit hídrico.

Além disso, quando expostas a deficiência hídrica, as plantas aumentam a atividade do sistema de defesa antioxidante, a fim de reparar ou eliminar as espécies reativas de oxigênio produzidas e/ou aumentada a partir de alguma, que causa estresse oxidativo (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; FOYER; NOCTOR, 2005).

Além disso, as plantas apresentam respostas bioquímicas quando expostas ao déficit hídrico e, de modo geral, foi observado que a suspensão da irrigação no presente estudo provocou respostas das plantas quanto ao sistema de defesa antioxidante (FIGURAS 8, 9 e 10) e, revelou que os clones avaliados sofreram danos oxidativos quando os mesmos passaram por período de déficit hídrico imposto, nos dois anos de avaliação.

De forma oposta, o retorno da irrigação demonstrou ser crucial para a manutenção da atividade das respectivas enzimas analisadas, pois apresentavam níveis mais baixos. Ramalho et al. (2018), observou que em genótipos de café em condições de déficit hídrico, houve aumento nas atividades das enzimas antioxidantes, SOD, CAT e APX). Estudos relacionaram grande aumento nas atividades das enzimas antioxidantes na cultura do café em condições estressantes (LIMA *et al.*, 2002, FORTUNATO *et al.*, 2010; RAMALHO *et al.*, 2018).

Em condições normais de irrigação, APSI e 3mARI, foi observado níveis altos de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), mesmo sendo uma espécie reativa de oxigênio (ERO), esta apresenta uma menor reatividade em relação as outras e maior estabilidade (GRATÃO *et al.*, 2005) e, as EROs são produzidas a partir de subprodutos da respiração e fotossíntese, e mesmo em condições normais de desenvolvimento, as plantas produzem mesmo que em pequena proporção (SHARMA *et al.*, 2012).

Além do efeito tóxico ocasionado pela alta concentração  $H_2O_2$ , é importante destacar que em menores quantidades atuam como sinalizador das plantas a diferente estresse a ela imposto (ANJUM *et al.*, 2017; SHARMA *et al.*, 2012). Níveis mais baixos de  $H_2O_2$  resultam em neutralização mais eficiente desta ERO, devido a maior atividade e níveis das enzimas CAT, SOD e APX.

Como foi possível observar, a SOD pouco se alterou nos períodos de avaliação do ano de 2016, já em 2017, nota-se que em APSI e FPSI houve maior atividade dessa enzima em relação aos outros períodos. O clone 125 apresentou maior atividade para estes dois períodos, assim como o clone 8 para APSI. A SOD é a primeira linha de defesa da planta na eliminação de espécies reativas de oxigênio, sendo responsável na dismutação do radical siperóxido em  $H_2O_2$  e  $O_2$  (SHARMA *et al.*, 2012; BARBOSA *et al.*, 2014).

O peróxido de hidrogenio resultante da dismutação da SOD é neutralizado pelas enzimas APX e CAT, ressaltados-e que a grande afinidade da peroxidase do ascorbato pelo  $H_2O_2$  em relação à CAT, tornando-a eficiente em condições estressantes (SHARMA *et al.*, 2012). Foi observada maior atividade da APX em relação à catalase, explicando assim sua menor atividade, o que pode ter resultado na neutralização de  $H_2O_2$ , pois o mesmo é convertido pela em água e oxigênio (SHARMA *et al.*, 2012; CAVERZAN *et al.*, 2020).

Corroborando com os resultados apresentados, estudo relata que houve aumento na atividade da APX em cultivar da espécie *Coffea canephora* em condições de déficit hídrico, e eficiente na eliminação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (LIMA *et al.*, 2002; RAMALHO *et al.*, 2018).

De acordo com CIA *et al.* (2012), a quantificação e observação de peroxidação lipídica nas plantas, pode ser importante na determinação da sensibilidade das culturas frente a um déficit hídrico. A peroxidação lipídica, avaliada pelos níveis de malondialdeído (MDA), apresentou aumento no ano de 2017 em relação a 2016 em todos os períodos avaliados (FIGURA13). É importante destacar que o clone 14 (tolerante ao déficit hídrico), apresentou níveis baixos de MDA quando submetido às condições de suspensão da irrigação, salientando-se a sua capacidade de tolerância à seca. Lima et al 2002, quando avaliou o sistema antioxidante de clones de café, assim como o 14, concluiu que este clone demonstra capacidade de proteção contra os danos causados pelo estresse oxidativo.

A avaliação de teores de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e MDA, bem como a atividade enzimática do sistema antioxidante, revelou que os clones avaliados sofreram danos oxidativos quando os mesmos passaram por período de déficit hídrico imposto, nos dois anos de avaliação. Níveis mais baixos de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> resultam em neutralização mais eficiente desta ERO, devido a maior atividade e níveis das enzimas CAT, SOD e APX. Além do efeito tóxico ocasionado pela alta concentração H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, é importante destacar que em menores quantidades atuam como sinalizador das plantas a diferente estresse a ela imposto (ANJUM *et al.*, 2017; SHARMA *et al.*, 2012).

Diante os danos causados por formação de espécies reativas de oxigênio, resultando em peroxidação lipídica, a quantificação do extravasamento de eletrólitos é de suma importância, visto que a perda de eletrólitos pode causar danos às membranas celulares, que por sua vez desenvolve processos peroxidativos e consequentemente a perda de eletrólitos que mantém as plantas túrgidas (QUEIROZ *et al.*, 2002). Foi possível observar maior dano ocasionado ao clone 30, pois o mesmo apresentou maior extravasamento de eletrólitos em FPSI de 2016 e 2016, resultado da sua maior peroxidação lipídica (FIGURA 13).

O sistema antioxidante não enzimático pode ser um mecanismo utilizado por cafeeiro durante o seu ciclo de vida, até mesmo quando o regime hídrico está se reestabelecendo. Além de exercer papel no metabolismo antioxidante não enzimático, o ascorbato é um importante antioxidante, devido a sua capacidade de doação de elétrons a várias reações, seja elas enzimáticas ou não (SHARMA *et al.*, 2012), e pode participar da rota de biossíntese do tocoferol, outro importante agente do metabolismo não antioxidante (SZARKA *et al.*, 2012) e participa na eliminação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> juntamente com a APX (RAMALHO *et al.*, 2018).

Concomitantemente as enzimas, os metabólitos não enzimáticos atuam na eliminação das EROS, reduzindo assim o dano oxidativo (GRATÃO *et al.*, 2005; BARBOSA *et al.*, 2014). Foi observada variação nos níveis de ascorbato nos períodos e anos de avaliação, ressaltando-se que o clone 30 apresentou maior valor em FPSI, salientando que o mesmo busca diferentes mecanismos para se adaptar em condições ambientais adversas de cultivo, via síntese de ação de sistema antioxidante enzimático e não enzimático. Em estudo com plantas de café em condições de déficit hídrico, também foi observado aumento nos níveis de ascorbato (RAMALHO *et al.*, 2018). Plantas que possuam maior capacidade em contornar disfunções no metabolismo diante do estresse podem garantir sua sobrevivência e crescimento durante este período de imposição da deficiência hídrica (OSAKABE *et al.*, 2014; RONCHI; MIRANDA, 2020).

Adicionalmente, como resposta a condições de estresse hídrico imposto, o café desencadeia a atividade do sistema de defesa antioxidante para limitar os danos celulares, evidenciado em clones de *Coffea canephora*, podendo estar associado com a tolerância ao déficit hídrico dos mesmos (LIMA *et al.*, 2002; RAMALHO *et al.*, 2018). Portanto, componentes antioxidantes são potenciais para serem usados na seleção de plantas em condições de cultivo com imposição de déficit hídrico (RAMALHO *et al.*, 2018).

Os resultados apontam que os clones que mais se aproximam do clone 14 antes e depois da suspensão da irrigação foram o 8 e 125. Já o clone que mais se aproximou do clone 22 considerando as variáveis analisadas, foi o 30, enquanto que o clone 114 apresentou um comportamento intermediário. Nos períodos de recuperação, após passar pelo estresse da deficiência hídrica, os clones 14 e 22 invertem o comportamento, onde o clone 14 passa a se assemelhar ao clone 30 e o 22 aos clones 8 e 125.

## 6 CONCLUSÕES

De modo geral, diante os resultados apresentados, pode-se inferir que os clones ativaram diferentes mecanismos para melhor adaptação frente às condições de manejo e cultivo, apresentando alterações fisiológicas, anatômicas e bioquímicas.

Os clones 8, 125 são mais semelhantes ao tolerante a seca (14) e o 30 ao clone 22, mais sensível, ficando apenas o 114 intermediário. Apesar da sensibilidade ao déficit hídrico, os clones 30 e 22 apresentam uma recuperação mais rápida.

Conclui-se que as características fisiológicas, potencial hídrico, bem como trocas gasosas, eficiência do uso da água, conteúdo relativo de água e anatômicas, relacionadas ao sistema de transporte de águas, ou seja, o xilema, são potenciais para a seleção de plantas em sistema de cultivo no Cerrado do Planalto central.

Avaliação do sistema de defesa antioxidante é importante na seleção e distinção de plantas de café submetidas à deficiência hídrica controlada podendo garantir maior sobrevivência e crescimento.

## REFERÊNCIAS

- ALTER, S. *et al.* **DroughtDB**: An expert-curated compilation of plant drought stress genes and their homologs in nine species. Oxford: Database, 2015. p. 1-7.
- ALVES, G. S. C. *et al.* Nucleotide diversity of the coding and promoter regions of DREB1D, a candidate gene for drought tolerance in *Coffea* species. **Tropical Plant Biology**, [S.l.], v. 11, n. 1-2, p. 31-48, 2018.
- AMARANTE, C. V. T. *et al.* Quantificação da área e do teor de clorofilas em folhas de plantas jovens de videira 'Cabernet Sauvignon' mediante métodos não destrutivos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S.l.], v. 31, n. 3, p. 680-686, 2009.
- AMRITPHALE, D.; SHARMA, S. K. Xylem hydraulics: Rising up and higher! **Resonance**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 223-231, 2010.
- ANJUM, S. A. *et al.* Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 8, 2017.
- ANDEREGG, W. R. L. *et al.* Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. **Science**, [S.l.], v. 349, n. 6247, p. 528-532, 2015.
- ARAÚJO, S. A. C.; DEMINICS, B. B. Fotoinibição da fotossíntese. **Revista Brasileira de Biociências**, [S.l.], v. 7, n. 4, 2009.
- BARBIERI JUNIOR, E. *et al.* Um novo clorofilômetro para estimar os teores de clorofila em folhas do capim Tifton 85. **Ciência Rural**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 2242-2245, 2012.
- BARRS, H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of biological sciences**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 413-428, 1962.
- BHATT, I.; TRIPATHI, B. N. Plant peroxiredoxins: catalytic mechanisms, functional significance and future perspectives. **Biotechnology advances**, [S.l.], v. 29, n. 6, p. 850-859, 2011.
- BALIZA, D. P. *et al.* Trocas gasosas e características estruturais adaptativas de cafeeiros cultivados em diferentes níveis de radiação. **Coffee Science**, Lavras, v. 7, n. 3, p. 250-258, 2012.
- BARBOSA, M. R. *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.3, p.453-460, 2014.
- BATISTA, L. A. *et al.* Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.
- BERTHAUD, J.; CHARRIER, A. Genetic resources of *Coffea*. In: CLARKE, R. J. (Ed). MACRAE, R. (Ed). **Coffee: Agronomy**. Londres: Elsevier Applied Science, 1988. Cap. 4. p. 1-42.

- BERTOLINO, L. T.; CAINE, R. S.; GRAY, J. E. Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. **Frontiers in plant science**, [S.l.], v. 10, p. 225, 2019.
- BOARETTO, L. F. *et al.* Water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, [S.l.], v. 74, p. 165-175, 2014.
- BORGHETTI, M. *et al.* Long-term temporal relationships between environmental conditions and xylem functional traits: a meta-analysis across a range of woody species along climatic and nitrogen deposition gradients. **Tree Physiology**, [S.l.], v. 37, n. 1, p. 4-17, 2017.
- BUNN, C. *et al.* A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, Cambridge, v. 129, n. 1-2, p. 89-101, 2015.
- CAMARGO, A. P. D.; CAMARGO, M. B. P. D. Definition and outline for the phenological phases of arabic coffee under brazilian tropical conditions. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68. 2001.
- CANAVAR, O. *et al.* Determination of the relationship between water use efficiency, carbon isotope discrimination and proline in sunflower genotypes under drought stress. **Australian Journal of Crop Science**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 232, 2014.
- CARVALHO, M. H. C. Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. **Plant signaling & behavior**, v. 3, n. 3, p. 156-165, 2008.
- CASTANHEIRA, D. T. *et al.* Potencial de utilização de características anatômicas e fisiológicas na seleção de progênies de cafeeiro. **Coffee Science**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 375-385. 2016.
- CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal**: estrutura e função de órgãos vegetativos. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.
- CAVATTE, P. C. *et al.* Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. **Physiologia plantarum**, [S.l.], v. 144, n. 2, p. 111-122, 2012.
- CAVERZAN, A. *et al.* Plant responses to stress: role of ascorbate peroxidase in the antioxidant protection. **Genetics and Molecular Biology**, [S.l.], v. 35, n. 4, p. 1011-1019, 2020.
- CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. 2019. Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/sistema-de-monitoramento-de-seca-para-o-brasil-fevereiro2019/>. Acesso: 19 jun. 2020.
- CHESEREK, J. J.; GICHIMU, B. M. Drought and heat tolerance in coffee: a review. **International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science**, Sapele, v. 2, n. 12, p. 498-501, 2012.



- CHEN, D. *et al.* Genotypic variation in growth and physiological response to drought stress and re-watering reveals the critical role of recovery in drought adaptation in maize seedlings. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 6, p. 1241, 2016.
- CHOAT, B. Predicting thresholds of drought-induced mortality in woody plant species. **Tree Physiology**, [S.l.], v. 33, n. 7, p. 669-671, 2013.
- CHOAT, B. *et al.* Noninvasive measurement of vulnerability to drought-induced embolism by X-ray microtomography. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 170, n. 1, p. 273-282, 2016.
- CIA, M. C. *et al.* Antioxidant responses to water deficit by drought-tolerant and-sensitive sugarcane varieties. **Annals of Applied Biology**, [S.l.], v. 161, n. 3, p. 313-324, 2012.
- CINTRA, P. H. N. *et al.* Análise de fluorescência da clorofila a em mudas de cafeeiro sob estresse hídrico. **Brazilian Journal of Development**, [S.l.], v. 6, n. 5, p. 28006-28014, 2020.
- COELHO, G. *et al.* Efeito de épocas de irrigação e de parcelamento de adubação sobre a produtividade do cafeeiro 'Catuai'. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 67-73, 2009.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2020 - terceiro levantamento**. Brasília: Conab, 2020. 54 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cafes>. Acesso em: 01 out. 2020.
- COSTA, G. F.; MARENCO, R. A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta amazônica**, [S.l.], v. 37, n. 2, p. 229-234, 2007.
- CRAPARO, A. C. W. *et al.* *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.l.], v. 207, p. 1-10, 2015.
- CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**, [S.l.], v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.
- DAMATTA, F. M. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. **Brazilian journal of plant physiology**, [S.l.], v. 16, n. 1, p. 1-6, 2004.
- DAMATTA, F. M. *et al.* 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**, [S.l.], v. 66, n. 21, p. 5264-5274, 2018.
- 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**, [S.l.], v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.
- DAS, K.; ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in environmental science**, [S.l.], v. 2, p. 53, 2014.

DAVIS, A. P. *et al.* High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. **Science advances**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 3473, 2019.

DEDECCA, D. M. Anatomia e desenvolvimento ontogenético de *Coffea arabica* L. var. *typica* Cramer. **Bragantia**, [S.l.], n. 16, p. 315-355, 1957.

DINAKAR, C.; DJILIANOV, D.; BARTELS, D. Photosynthesis in desiccation tolerant plants: energy metabolism and antioxidative stress defense. **Plant Science**, [S.l.], v. 182, p. 29-41, 2012.

DING, Y. *et al.* Four distinct types of dehydration stress memory genes in *Arabidopsis thaliana*. **BMC plant biology**, [S.l.], v. 13, n. 1, p. 229, 2013.

DUBBERSTEIN, D. *et al.* Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1049, 2020.

ERDIANSYAH, N. P. *et al.* Growth response of seedlings of four robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre. Ex. A. Froehner) clones to drought stress. **Pelita Perkebunan (a Coffee and Cocoa Research Journal)**, [S.l.], v. 35, n. 1, p. 1-11, 2019.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and molecular life sciences**, [S.l.], v. 72, n. 4, p. 673-689, 2015.

FAVARETTO, V. F. *et al.* Differential responses of antioxidant enzymes in pioneer and late-successional tropical tree species grown under sun and shade conditions. **Environmental and Experimental Botany**, [S.l.], v. 70, n. 1, p. 20-28, 2011.

FASOLIN, J. P. *et al.* Variação anatômica e fisiológica do amendoim (cultivar IAPAR 25 Tição) cultivado sob diferentes regimes hídricos. **Acta Iguazu**, [S.l.], v. 8, n. 3, p. 92-104, 2019.

FERRÃO, R. G. *et al.* Melhoramento genético para obtenção da cultivar Marilândia ES 8143, variedade clonal de café conilon tolerante a seca. **Multi-Science Research**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 1-18, 2018.

FERRARI, E.; DA PAZ, A.; DA SILVA, A. C. Déficit hídrico e altas temperaturas no metabolismo da soja em sementeiras antecipadas. **Nativa**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.

FERRAZ, R. L. S. *et al.* Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S.l.], v. 42, n. 2, p. 181-188, 2012.

FERNANDES, A. L. T. *et al.* Associação da adubação orgânica com a irrigação na produção de café no cerrado Mineiro. **Revista Ambiente & Água**, [S.l.], v. 15, n. 5, e2578, 2020.

FERNANDES, A. L. T. *et al.* A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S.l.], v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.

FLETA-SORIANO, E.; MUNNÉ-BOSCH, S. Stress memory and the inevitable effects of drought: a physiological perspective. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 7, p. 143, 2016.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. **Plant, Cell & Environment**, [S.l.], v. 28, n. 8, p. 1056-1071, 2005.

FRIENDLY, M.; FOX, J. Candisc: Visualizing Generalized Canonical Discriminant and Canonical Correlation Analysis. **R package version 0.8-0**. 2017. Disponível em: <https://CRAN.Rproject.org/package=candisc>. Acesso em: 10 maio 2019.

GHINI, R. et al. Coffee growth, pest and yield responses to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. **Climatic Change**, [S.l.], v. 132, n. 2, p. 307-320, 2015.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, [S.l.], v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GRATÃO, P. L. *et al.* Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional plant biology**, [S.l.], v. 32, n. 6, p. 481-494, 2005.

GRISI, F. A. *et al.* Avaliações anatômicas foliares em mudas de café ‘Catuaí’ e ‘Siriema’ submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1730-1736, 2008.

GUAN, X. K. *et al.* Effect of drought on the gas exchange, chlorophyll fluorescence and yield of six different-era spring wheat cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [S.l.], v. 201, n. 4, p. 253-266, 2015.

GUERRA, F.; ROCHA, O. C.; RODRIGUES, G. C. Manejo do cafeeiro irrigado no cerrado com estresse hídrico controlado. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 65/66, p. 42-45, 2005.

HACKE, U. G. *et al.* Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. **Oecologia**, [S.l.], v. 126, n. 4, p. 457-461, 2001.

HACKE, U. G. *et al.* An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. **Plant, cell & environment**, [S.l.], v. 40, n. 6, p. 831-845, 2017.

HASAN, S. A. et al. Water use efficiency in the drought-stressed sorghum and maize in relation to expression of aquaporin genes. **Biologia plantarum**, [S.l.], v. 61, n. 1, p. 127-137, 2017.

HOFFMANN, W. A. *et al.* Hydraulic failure and tree dieback are associated with high wood density in a temperate forest under extreme drought. **Global Change Biology**, [S.l.], v. 17, n. 8, p. 2731-2742, 2011.

HUANG, C. *et al.* Alteration in chlorophyll fluorescence, lipid peroxidation and antioxidant enzymes activities in hybrid ramie (*Boehmeria nivea* L.) under drought stress. **Australian Journal of Crop Science**, [S.l.], v. 7, n. 5, p. 594, 2013.

ICO. International Coffee Organization. **Relatório sobre mercado de janeiro de 2019**. Londres, 2019. Disponível em: <http://www.ico.org/pt/Market-Report-18-19-p.asp>. Acesso em: 15 jan. 2020.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. *In: Global Warming of 1,5 °C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: IPCC, World Meteorological Organization, 2018. 28 p. p.

JACINTO JÚNIOR, S. G. *et al.* Respostas fisiológicas de genótipos de fava (*Phaseolus lunatus* L.) submetidas ao estresse hídrico cultivadas no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.l.], v. 34, n. 3, p. 413-422, 2019.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 1940. 523 p.

KAN, J. K.; HONG-MEI, W.; CHANG-HAI, J. Changes of reactive oxygen species and related enzymes in mitochondria respiratory metabolism during the ripening of peach fruit. **Agricultural Sciences in China**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 138-146, 2010.

KRAUS, J. E.; ARDUIM, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Seropédica: Edur, 1997. 198 p.

LIMA, A. L. S. *et al.* Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffea canephora* under water deficit conditions. **Environmental and experimental botany**, [S.l.], v. 47, n. 3, p. 239-247, 2002.

LISAR, S. Y. S. *et al.* Water stress in plants: Causes, effects and responses. *In: RAHMAN, M.; HASEGAWA, H. (Eds.). Water Stress*. Tech: Rijeka, Croatia, 2012. p. 1–14.

LOCATO, V. *et al.* Reactive oxygen species and ascorbate-glutathione interplay in signaling and stress responses. *In: GUPTA, S. D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants*. Enfield: Science Publishers, 2010. p. 45-64.

MACHADO, R. S. *et al.* Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, [S.l.], v. 44, n. 12, p. 1575-1582, 2009.

MAGRACH, A.; GHAZOUL, J. Climate and pest-driven geographic shifts in global coffee production: implications for forest cover, biodiversity and carbon storage. **PloS one**, [S.l.], v. 10, n. 7, p. e0133071, 2015.

MANAVALAN, L. P. *et al.* Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant and cell physiology**, [S.l.], v. 50, n. 7, p. 1260-1276, 2009.

MARRACCINI, P. *et al.* RBCS1 expression in coffee: *Coffea* orthologs, *Coffea arabica* homeologs, and expression variability between genotypes and under drought stress. **BMC Plant Biology**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 85, 2011.

- MARCOLAN, A. L. *et al.* **Cultivo dos cafeeiros conilon e robusta para Rondônia**. Embrapa Rondônia – Sistema de Produção. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2009. 67 p. Disponível em: [http://www.cpafrro.embrapa.br/media/arquivos/publicacoes/sp33\\_cafe.pdf](http://www.cpafrro.embrapa.br/media/arquivos/publicacoes/sp33_cafe.pdf). Acesso em: 14 out. 2020.
- MARTINS, L. D. *et al.* Combined effects of elevated [CO<sub>2</sub>] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea* spp. plants. **Climatic Change**, [S.l.], v. 126, n. 3-4, p. 365-379, 2014.
- MARTINS, M. Q. *et al.* Protective response mechanisms to heat stress in interaction with high [CO<sub>2</sub>] conditions in *Coffea* spp. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 7, p. 947, 2016.
- MELO, E. F. *et al.* Anatomic and physiological modifications in seedlings of *Coffea arabica* cultivar Siriema under drought conditions. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.l.], v. 38, n. 1, p. 25-33, 2014.
- MEDEIROS, D. B. *et al.* Physiological limitations in two sugarcane varieties under water suppression and after recovering. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, [S.l.], v. 25, n. 3, p. 213-222, 2013.
- MENDIBURU, F. **Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research**. R package version 1.2-0, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 maio 2019.
- MHAMDI, A.; NOCTOR, G.; BAKER, A. Plant catalases: peroxisomal redox guardians. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, [S.l.], v. 525, n. 2, p. 181-194, 2012.
- MILLER, G. A. D. *et al.* Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, cell & environment**, [S.l.], v. 33, n. 4, p. 453-467, 2010.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Portaria MMA nº 09/2007**. Áreas prioritárias para conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira. 2007.
- MONTAGNON, C. *et al.* Genotype-location interactions for *Coffea canephora* yield in the Ivory Coast. **Agronomie**, [S.l.], v. 20, p. 101-109, 2000.
- MONTAGNON, C.; LEROY, T. Réaction à la sécheresse de jeunes caféiers *Coffea canephora* de Cote-D'Ivoire appartenant à différents groupes génétiques. **Café, Cacao, Thé**, [S.l.], v. 37, p. 179-190, 1993.
- NARDINI, A.; ÖUNAPUU-PIKAS, E.; SAVI, T. When smaller is better: leaf hydraulic conductance and drought vulnerability correlate to leaf size and venation density across four *Coffea arabica* genotypes. **Functional Plant Biology**, [S.l.], v. 41, n. 9, p. 972-982, 2014.
- ORO, P. **Perda de eletrólitos radiculares em mudas de *Peltophorum dubium* e *Enterolobium contortisiliquum* submetidas a diferentes frequências de irrigação durante a rustificação**. 2012. 49 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2012.

- OSAKABE, Y. *et al.* Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 5, 86, p. 1-8, 2014.
- OLIVEIRA, I. *et al.* Compared leaf anatomy and water relations of commercial and traditional *Prunus dulcis* (Mill.) cultivars under rain-fed conditions. **Scientia Horticulturae**, [S.l.], v. 229, p. 226-232, 2018.
- PAIVA, J. G. A. *et al.* Verniz vitral incolor 500®: a mounting medium alternative and economically viable. **Acta Bot. Bras.**, [S.l.], v. 20, p. 257-264, 2006.
- PELOSO, A. F. *et al.* Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico. **Coffee Science**, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 389-399, 2017.
- PINHEIRO, C.; CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of experimental botany**, [S.l.], v. 62, n. 3, p. 869-882, 2011.
- PINHEIRO, H. A. *et al.* Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of botany**, [S.l.], v. 96, n. 1, p. 101-108, 2005.
- PINHEIRO, H. A. *et al.* Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long-term drought. **Plant science**, [S.l.], v. 167, n. 6, p. 1307-1314, 2004.
- PINTO, M. C.; GARA, L. Changes in the ascorbate metabolism of apoplastic and symplastic spaces are associated with cell differentiation. **Journal of experimental botany**, [S.l.], v. 55, n. 408, p. 2559-2569, 2004.
- PRAXEDES, S. C. *et al.* Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. Kouillou) leaves. **Environmental and Experimental Botany**, [S.l.], v. 56, p. 263-273, 2006.
- QUEIROZ, C. G. S.; GARCIA, Q. S.; LEMOS FILHO, J. P. Atividade fotossintética e peroxidação de lipídios de membrana em plantas de aroeira-do-sertão sob estresse hídrico e após reidratação. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 59-63, 2002.
- QUEIROZ-VOLTAN, R. B. *et al.* Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Biotemas**, Florianópolis, v. 27, n. 4, p. 1-10, 2014.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Acesso em: 10 maio 2019.
- REIS, F. O.; CAMPOSTRINI, E. Microaspersão de água sobre a copa: um estudo relacionado às trocas gasosas e à eficiência fotoquímica em plantas de mamoeiro. **Revista Brasileira Agrocência**, [S.l.], v. 17, p. 284-295, 2011.

REIS, L. A. C. **Influência do glyphosate na anatomia e fisiologia de cultivares de café arábica**. 2013. 61 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

RIBEIRO, M. N. O. *et al.* Anatomia foliar de mandioca em função do potencial para tolerância à diferentes condições ambientais. **Revista Ciência Agronômica**, [S.l.], v. 43, n. 2, p. 354-361, 2012.

RODRIGUES, W. P. *et al.* 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, 2018.

RODRIGUES, W. P. *et al.* Interação de altas temperaturas e déficit hídrico no cultivo de café Conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner). In: PARTELLI, F. L.; BONOMO, R. (Eds.) **Café Conilon: o clima e manejo da planta**. Alegre, ES: CAUFES, 2016. p. 39- 57.

ROLFE, S. A.; SCHOLLES, J. D. Chlorophyll fluorescence imaging of plant–pathogen interactions. **Protoplasma**, [S.l.], v. 247, n. 3–4, p. 163-175, 2010.

RONCHI, C. P.; MIRANDA, F. R. Flowering percentage in arabica coffee crops depends on the water deficit level applied during the pre-flowering stage. **Revista Caatinga**, [S.l.], v. 33, n. 1, p. 195-204, 2020.

SALES, C. R. G. *et al.* Photosynthetic and antioxidant responses to drought during sugarcane ripening. **Photosynthetica**, [S.l.], v. 53, n. 4, p. 547-554, 2015.

SALMON, Y.; LARS, D.; SEVANTO, S.; HÖLTTÄ, T.; DANNOURA, M.; EPRON, D. Impactos da seca no floema de árvores: das respostas em nível de célula à significância ecológica. In: **Fisiologia da árvore**, [S.l.], v. 39, p. 73-191, fevereiro de 2019.

SANTOS, C. M. *et al.* Photosynthetic capacity and water use efficiency in *Ricinus communis* (L.) under drought stress in semi-humid and semi-arid areas. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S.l.], v. 89, n. 4, p. 3015-3029, 2017.

SEVANTO, S. *et al.* Is desiccation tolerance and avoidance reflected in xylem and phloem anatomy of two coexisting arid-zone coniferous trees? **Plant, cell & environment**, [S.l.], v. 41, n. 7, p. 1551-1564, 2018.

SHARMA, P. *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of botany**, [S.l.], v. 2012, p. 1-26, 2012.

SILVA, C. D. S. *et al.* Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica. **Revista Caatinga**, [S.l.], v. 23, n. 4, p. 7-13, 2010.

SILVA, E. A. *et al.* Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, [S.l.], v. 89, n. 2-3, p. 349-357, 2004.

- SILVA, M. A. *et al.* Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, [S.l.], v. 30, n. 1, 2014.
- SILVA, P. E. M. *et al.* The functional divergence of biomass partitioning, carbon gain and water use in *Coffea canephora* in response to the water supply: implications for breeding aimed at improving drought tolerance. **Environmental and experimental botany**, [S.l.], v. 87, p. 49-57, 2013.
- SILVA, V. A. *et al.* Resposta fisiológica de clone de café Conilon sensível à deficiência hídrica enxertado em porta-enxerto tolerante. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.l.], v. 45, n. 5, p. 457-464, 2010.
- SOUZA, T. C. *et al.* Leaf plasticity in successive selection cycles of ‘Saracura’ maize in response to soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, [S.l.], v. 45, n. 1, p. 16-24, jan. 2010.
- SZARKA, András. *et al.* The ascorbate-glutathione- $\alpha$ -tocopherol triad in abiotic stress response. **International Journal of Molecular Science**, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 4458-4483, 2012.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.
- URLI, M. *et al.* Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. **Tree physiology**, [S.l.], v. 33, n. 7, p. 672-683, 2013.
- VAN DER VOSSEN, H.; BERTRAND, B.; CHARRIER, A. Next generation variety development for sustainable production of arabica coffee (*Coffea arabica* L.): a review. **Euphytica**, [S.l.], v. 204, n. 2, p. 243-256, 2015.
- VICHIATO, M. R. de M. *et al.* Análises estomática e morfométrica de folhas de plantas diplóides e tetraplóides de *Dendrobium nobile* Lindl. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 53, n. 310, p. 541-548, 2006.
- VINECKY, F.; SILVA, F. R.; ANDRADE, A. C. Análise in silico das bibliotecas de cDNA SH2 e SH3 para a identificação de genes responsivos à seca em cafeeiro. **Coffee Science**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 1-19, 2012.
- ZOKAEE-KHOSROSHAHI, M. *et al.* Morphological changes in response to drought stress in cultivated and wild almond species. **International Journal of Horticultural Science and Technology**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 79-92, 2014.