

ANDRESSA GAZOLLA CURSI

**DECIFRANDO A IMPORTÂNCIA DE ASPECTOS MORFOFISIOLÓGICOS NA
TOLERÂNCIA À SECA EM PROGÊNIES DE EUCALIPTO EM ÁREA DE
RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Wagner L. Araújo

Coorientador: Franciele Santos Oliveira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

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

T

C977d
2024 Cursi, Andressa Gazolla, 1987-
Decifrando a importância de aspectos morfofisiológicos na
tolerância à seca em progênies de eucalipto em área de restrição
hídrica / Andressa Gazolla Cursi. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (45 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Wagner Luiz Araújo.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.
Referências bibliográficas: f. 39-46.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.494>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Tolerância à seca. 2. Eucalipto - Fisiologia -
Efeito da seca. 3. Eucalipto - Morfologia - Efeito da seca.
4. Estresse hídrico. I. Araújo, Wagner Luiz, 1980-
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 634.973766

ANDRESSA GAZOLLA CURSI

**DECIFRANDO A IMPORTÂNCIA DE ASPECTOS MORFOFISIOLÓGICOS NA
TOLERÂNCIA À SECA EM PROGÊNIES DE EUCALIPTO EM ÁREA DE
RESTRIÇÃO HÍDRICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de maio de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRESSA GAZOLLA CURSI**
Data: 22/08/2024 15:50:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andressa Gazolla Cursi
Autor

Documento assinado digitalmente
 **WAGNER LUIZ ARAUJO**
Data: 22/08/2024 16:05:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Wagner L. Araújo
Orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ser minha fonte de força, sabedoria e inspiração ao longo desta jornada acadêmica. Sua orientação divina foi fundamental em cada passo que dei.

Aos meus amados pais, Dirnei e Luiz, dedico uma gratidão imensurável. Seu amor incondicional, apoio inabalável e incentivo constante foram os pilares que sustentaram meu caminho até aqui. Cada conquista é também de vocês.

Ao meu estimado orientador Wagner L. Araújo, sou imensamente grata pela oportunidade concedida, pelos ensinamentos transmitidos, pela paciência demonstrada em momentos desafiadores e pelos inúmeros aprendizados adquiridos ao seu lado. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como pesquisadora.

À minha coorientadora, Fran, expresso minha sincera gratidão pela contribuição, pelos ensinamentos enriquecedores e pelo apoio constante ao longo deste processo. Sua colaboração foi fundamental para o sucesso deste projeto.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, manifesto minha gratidão por todo o conhecimento compartilhado e pela dedicação em minha formação acadêmica. Cada aula e cada orientação foram essenciais para o meu desenvolvimento como cientista. À Graça, que sempre esteve disposta a ajudar, expresso meu sincero agradecimento. Sua generosidade e disposição em auxiliar foram fundamentais em momentos de dificuldade.

Ao professor Glêison dos Santos, agradeço pela oportunidade concedida e pela confiança depositada em meu trabalho. Sua mentoria foi de extrema importância para o progresso desta pesquisa.

Às empresas participantes do Projeto Tolerância à Seca- Aperam, Bracell, Cenibra, CMPC, Duratex, Eldorado, Gerdau, International Paper, Klabin, Vallourec, Veracel e Suzano -, expresso minha sincera gratidão pela colaboração, suporte e contribuição para a realização deste estudo.

Aos amigos e colegas da UCP, Dora, Wesley, Barbara, Jessica, Tamara e em especial a Debora, agradeço pela convivência enriquecedora, pelo apoio mútuo

e pelos momentos de aprendizado compartilhados. Sua amizade tornou esta jornada mais leve e significativa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada e à UCP, pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa, expresso minha gratidão pela formação oferecida e por disponibilizar sua estrutura e recursos para a realização dos experimentos. Sem o apoio dessas instituições, este trabalho não teria sido possível.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – Brasil (FAPEMIG) – código de financiamento 12.2466.01-8 e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq) – Código de Financiamento 40.0101.00-9.

RESUMO

CURSI, Andressa Gazolla, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2024. **Decifrando a importância de aspectos morfofisiológicos na tolerância à seca em progênies de eucalipto em área de restrição hídrica.** Orientador: Wagner L. Araújo. Coorientadora: Franciele Santos Oliveira

A deficiência hídrica é um dos fatores que mais limitam a produtividade do *Eucalipto*. Para um pleno desenvolvimento dos plantios comerciais de eucalipto, torna-se essencial a seleção de clones com características tolerantes à seca, principalmente, em áreas de baixa precipitação e com períodos secos definidos. Não obstante, mudanças climáticas, principalmente relacionadas a aumentos na temperatura, podem favorecer a aumentos no déficit hídrico e prejudicar, em última instância, o desenvolvimento vegetal. Condições edafoclimáticas adversas e prolongadas induzem a mudanças fisiológicas, bioquímicas e morfológicas nas plantas como forma de resistência. Neste contexto, a identificação de indicadores relacionados às variáveis climáticas permite a seleção de clones com características de tolerância à seca. O experimento iniciou-se em março de 2019, utilizando-se 27 famílias de progênies de eucalipto oriundas de cruzamento de plantas com características previamente selecionadas associadas à tolerância a seca, onde foram implantadas em uma fazenda da empresa Minas Ligas, situada na região de Buritizeiro-Minas Gerais. A região é caracterizada por alta deficiência hídrica e as coletas foram realizadas após 6, 18 e 30 meses ao plantio, ao final dos ciclos de seca. Dados meteorológicos foram obtidos pelo site do INMET para possibilitar a seleção precoce de clones de Eucaliptos mais aptos a tolerar eventos recorrentes de seca. A avaliação climatológica da área evidenciou um período seco característico entre abril e setembro nos três anos. Foram analisados área foliar específica (AFE) obtida através da área foliar sobre a massa seca da amostra de folhas [área foliar (cm²) / massa seca (g)], área foliar (AF) (superfície total das folhas), comprimento (C), largura (L) e potencial hídrico foliar (Ψ_w) (medida de energia livre da água a qual representa a capacidade da mesma de realizar trabalho) submetidas ao teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade para comparação de médias. Clones e progênies como GG2673, VM1, GG1923, GG1980, GG3389XGG4302, GG918XVS62, AEC2034xLR831, I3000XVM1, VM4XCAM e VM1xVM4 exibiram ajustes fisiológicos

e apresentaram maiores valores de incremento médio anual (Imavol), sendo, portanto, materiais genéticos com potencial tolerância à seca. Os parâmetros AFE, AF e Ψ_w revelaram-se como bons bioindicadores de tolerância à seca.

Palavras-chave: tolerância à seca, eucaliptos, estresse hídrico

ABSTRACT

CURSI, Andressa Gazolla, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio, 2024. **Deciphering the importance of morphophysiological aspects in drought tolerance in eucalyptus progenies in water-restricted areas.** Adviser: Wagner L. Araújo. Co-adviser: Franciele Santos Oliveira.

Water limitation is one of the factors that most impact plant growth and productivity, especially for Eucalyptus. For commercial eucalyptus plantations to develop properly, it is essential to select clones with drought-tolerant characteristics, especially in areas with low rainfall and well-defined dry periods. Accordingly, climate change, mainly related to increases in mean annual temperature, can lead to a more severe water deficit and ultimately harm plant development. Thus, the identification of indicators related to climatic variables enables the selection of clones with drought tolerance characteristics. Here, we used 27 families of eucalyptus progenies from crosses of plants with previously selected characteristics associated with drought tolerance, which were planted in a region characterized by high water deficiency. Sample harvesting was performed at 6, 18, and 30 months after planting, at the end of natural drought cycles. Meteorological data coupled with physiological analyses allow the early selection of Eucalyptus clones that are better able to tolerate recurrent drought events. Specific leaf area (SLA) obtained through the leaf area over the dry mass of the leaf sample [leaf area (cm²) / dry mass (g)], leaf area (LA) (total leaf area), length (C), width (L) and leaf water potential (Ψ_L) (a measure of the free energy of water which represents its capacity to do work) were analyzed and submitted to the Scott-Knott test at 5% probability to compare means. Specific clones and progenies (e.g., GG2673, VM1, GG1923, GG1980, GG3389XGG4302, GG918XVS62, AEC2034xLR831, I3000XVM1, VM4XCAM and VM1xVM4) were characterized by physiological adjustments and showed higher average annual increment values, and were assumed as genetic materials with potential drought tolerance.

Keywords: drought tolerance, eucalyptus, water stress

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
2.1- Dados meteorológicos.....	14
2.2 -Variáveis Morfofisiológicas e Produtividade.....	14
2.2.2- Potencial hídrico foliar.....	15
2.2.3. - Determinação de variáveis morfológicas.....	16
2.3- Análise estatística.....	16
3.1- Descrição meteorológica da área.....	17
3.2.1 Avaliações morfológicas aos 6 meses.....	23
3.2.2 Avaliações morfológicas aos 18 meses.....	25
3.2.3 -Avaliações morfológicas aos 30 meses.....	27
3.3- Correlação entre clones/progênies e variáveis morfofisiológicas.....	29
3.4 - Produtividade e variáveis climáticas.....	31
5. CONCLUSÕES.....	37
6. REFERÊNCIAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* spp. pertence à família Myrtaceae, composto por mais de 700 espécies (Beech et al., 2017; Chemlali et al., 2022 e Ferreira et al., 2022) tendo sua origem na Austrália com algumas espécies em Papua, Nova Guiné, Indonésia e Filipinas (Leicach et al., 2012; Elaieb et al., 2019; Chemlali et al., 2022) Os maiores produtores de eucalipto são China, Índia e Brasil (Saravanan 2018; IBA 2020 e Ferreira et al., 2022). As condições edafoclimáticas no território brasileiro favoreceram a expansão da produtividade de florestas plantadas, em especial as de eucalipto (Gonçalves et al., 2017; Hakamada et al., 2023). O Brasil possui 9,94 milhões de hectares de florestas plantadas com produtividade média de 35,3 m³/ha/ano, sendo 76% da área (7,6 milhões de hectares) cultivadas com eucalipto e 19% de pinus (~ 1,93 milhão de hectares). Os plantios de eucalipto estão concentrados principalmente nos estados de Minas Gerais (29%), São Paulo (13%) e Mato Grosso do Sul (15%) (IBÁ, 2023).

Em razão da ótima qualidade de madeira, a biomassa de eucalipto é utilizada como fonte de madeira, papel, celulose e bioenergia, reduzindo a pressão na exploração de florestas naturais e contribuindo, portanto, para conservação da biodiversidade (Oberschelp et al., 2022; Noletto-Dias et al., 2023). Além da sua importância socioeconômica, as plantações comerciais de eucalipto possuem uma grande influência no clima e podem contribuir, ao menos parcialmente, para mitigar o impacto das mudanças climáticas por atuarem como sumidouros de carbono (Gustavsson et al., 2017; Yang et al., 2018). Uma das opções promissoras de plantio de eucalipto altamente produtivas e estáveis é a utilização de SAFs (sistemas agroflorestais), sendo uma alternativa a monocultura. Como vantagens, esses sistemas reduzem custos e diversificam a produção, além de oferecerem melhoria na qualidade do solo (química, física e biológica) e diminuírem o risco de erosão (Laura et al., 2021).

Para o sucesso dos plantios florestais, em particular do eucalipto, é necessário que as condições climáticas sejam favoráveis, ocorra emprego de técnicas adequadas de manejo florestal, exista um controle integrado de

pragas e doenças eficiente, tenha disponibilidade água, luz e nutrientes em níveis satisfatórios e investimentos no melhoramento genético (Campoe et al., 2016; Yang et al., 2018; Reis, 2018). Com efeito, apesar da grande adaptabilidade climática do eucalipto, condições edafoclimáticas adversas podem interferir no desenvolvimento, produtividade e expansão de áreas cultivadas. Embora avanços no melhoramento genético e nas práticas silviculturais beneficiaram a produtividade do eucalipto, a deficiência hídrica é o fator mais limitante na redução da produtividade de eucaliptos (Zonta et al., 2017; Conti Junior et al., 2020), pois compromete processos importantes incluindo a fotossíntese, respiração e metabolismo dos carboidratos (Martins et al., 2018). O clima é um dos principais fatores a serem considerados na escolha das espécies a serem plantadas (Souza et al., 2017, An et al., 2022), isso porque a interação entre genótipo e ambiente desempenha um papel crucial na determinação do potencial de produção de madeira em florestas plantadas de eucalipto no Brasil (Campoe et al., 2020). Como a qualidade da madeira é influenciada por esses dois fatores (espécie e condições climáticas), entender essas relações é crucial para considerar o desempenho dos genótipos sob os efeitos do clima (Melo et al., 2024; Elissetche et al., 2024). Assim, com base em informações sobre o local de plantio, será possível decidir quais espécies podem apresentar melhor adaptação (Alvares et al., 2013, Rocha et al., 2020).

Condições adversas (e.g. seca prolongada e altas temperaturas) induzem respostas morfofisiológicas, anatômicas e bioquímicas que possibilitam que plantas apresentem tolerância e sobrevivência em tais situações adversas (Blackman et al., 2017; Martins et al., 2018; Chain et al., 2020). Dentre tais respostas incluem, por exemplo, reduções da área foliar, aumento da espessura da folha, fechamento dos estômatos, diminuição no potencial hídrico e vasos do xilema mais estreitos (Xu et al., 2018). O déficit hídrico, ou seca, ocorre quando a quantidade de água transpirada é superior à absorvida pelas raízes. Se o potencial hídrico continuar a diminuir, podem formar-se bolhas de gás no interior dos vasos do xilema, levando à morte da planta (Choat et al., 2012; Choat et al., 2018). Em resposta à limitação hídrica, as plantas utilizam ajustes morfoanatômicos, fisiológicos e bioquímicos para

neutralizar a perda de água e manter o seu equilíbrio hídrico (Chaves et al., 2011; Lisar et al., 2016; Kapoor et al., 2020). Estudos recentes enfatizam a importância da seleção de clones de eucalipto com tolerância à seca através de características morfofisiológicas e moleculares visando a seleção de genótipos que possam manter a produtividade em condições adversas (Correia et al. 2018; Favreau et al. 2019; Romeet et al. 2019; Chen et al., 2020; Müller et al., 2020 e Ferreira et al., 2023).

Cumprе ressaltar, que, em 2014, cerca de 150.000 hectares foram perdidos devido a um devastador evento climático em Minas Gerais (Diário do Comércio, 2018), o que chamou a atenção de diversas empresas do setor florestal, além da comunidade científica em geral. Com efeito, de acordo com os relatórios do IPCC (www.ipcc.ch) espera-se um aumento na temperatura média global, além da intensificação de eventos extremos, incluindo as secas mais severas, o que irá impactar, sobretudo, a sobrevivência em longo prazo das espécies vegetais (Harfouche et al., 2014; Hakamada et al., 2017). É plausível sugerir que essa nova condição reduzirá a produtividade e aumentará a duração do ciclo de rotação das florestas de eucalipto (González-Orosco et al., 2016; Gonçalves et al., 2017). Nesse contexto, a seleção de materiais genéticos mais tolerantes à seca apresenta-se como uma ferramenta importante para minimizar os impactos da deficiência hídrica na produtividade, particularmente em locais sujeitos a flutuações frequentes na disponibilidade hídrica. Os resultados e informações geradas contribuirão para programas de melhoramento genético e manejo florestal de forma a otimizar o sistema produtivo da cultura com vistas a aumentos na produtividade além de facilitar a introdução de espécies de eucalipto em áreas com frequente escassez hídrica (Lamy et al., 2014; González-Orosco et al., 2016; Blackman et al., 2017; Chain et al., 2020). Com efeito, diversos parâmetros, sejam fisiológicos, bioquímicos ou anatômicos, podem auxiliar na seleção de materiais genéticos tolerantes à seca. Embora vários estudos já tenham sido realizados em diferentes espécies vegetais, para compreender a tolerância à seca, como a pesquisa conduzida por Câmara et al., 2021 em que analisaram as características da madeira e correlacionaram com as variáveis meteorológicas para cada ano de crescimento das árvores, em quatro locais com diferentes condições climáticas

e uma redução de 33% na precipitação, pouco foi explorado sobre os potenciais impactos das flutuações das variáveis meteorológicas em regiões com secas prolongadas que podem ser utilizados na predição da produtividade comercial de eucalipto.

O ciclo de rotação para o eucalipto é, normalmente, de sete anos. Neste contexto, identificar, de maneira precoce, os preditores de tolerância à seca em eucalipto minimizaria os riscos com perdas decorrentes de extremos climáticos. Nossa hipótese é investigar como as variáveis meteorológicas podem estar associadas com aspectos produtivos e morfofisiológicos relacionados à tolerância a seca em eucalipto cultivado em um local com período seco bem definido. Informações detalhadas sobre como as variáveis meteorológicas afetam a tolerância à seca podem ser valiosas para a seleção de variedades mais resistentes e para o desenvolvimento de programas de melhoramento genético, visando aumentar a resiliência das plantações de eucalipto às condições climáticas adversas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi realizado entre março de 2019 e setembro de 2021 com uso de progênies de eucalipto (*Eucalyptus sp.*) oriundas de cruzamento de plantas com características previamente selecionadas associadas à tolerância a seca, o que totalizou 27 famílias (Tabela 1). Sementes dos cruzamentos listados na Tabela 1 foram implantadas em uma fazenda da empresa Minas Ligas, situada na região de Buritizeiro-Minas Gerais (17° 05'49" S e 44° 53'09" O) (Figura 1). Essa região caracteriza-se por apresentar um clima tropical classificado com Aw de acordo com o sistema de classificação climática de Köppen, com estação bem seca definida entre os meses de maio a agosto. Segundo os dados obtidos do ClimateData.org (climatedata.org, nd.), a temperatura média anual registada é em torno de 24.5 °C e a pluviosidade média anual é 1102 mm. Apresenta altitude de aproximadamente 570m, solo com textura média com porcentagem de argila <35% e areia > 15%, de acordo com Santos et al., 2018 e deficiência hídrica bem acentuada.

Foi adotado um delineamento de blocos ao acaso, em que os tratamentos foram 27 progênies, com seis repetições. As plantas estavam dispostas em blocos retangulares de 8m x10m e espaçamento de 3.5m x 2.57m (9m²/planta).

Tabela 1: Lista das progênies de eucalipto cultivados em condições de campo em Buritizeiro-Minas Gerais. Nos cruzamentos foram levados em consideração critérios como tolerância à seca e produtividade baseados em dados das empresas participantes do projeto Tolerância à Seca

GG2673	Testemunha (<i>E. urophylla</i>)
GG1923	Testemunha (<i>E. urophylla</i>)
VM1	Testemunha (<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>)
AEC1528	Testemunha (<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>)
I144	Testemunha (<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>)
GG1980	Testemunha (<i>E. urophylla</i>)
GG3389xGG4302	(<i>E. urophylla</i> HE) x (<i>E. brassiana</i>)
GG918xGG918	(<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. camaldulensis</i>)
GG918xVS62	(<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. camaldulensis</i>)
GG4304xAEC2034	(<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>) x (<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>))
CNB16xCNB16	(<i>E. urophylla</i> HE x <i>E. urophylla</i> HE)
GG4383xAEC2197	((<i>E. grandis</i> x <i>E. brassiana</i>) x <i>E. pellita</i>) x (<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>))
GG3633xGG4302	(<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. brassiana</i>)
GG4304Xaec2197	(<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>) x (<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>))
GG2034Xpel	(<i>E. grandis</i> HE x <i>E. pellita</i>)
GG682xBRA	(<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>) x (<i>E. brassiana</i>)
GG918xPEL	(<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. pellita</i>)
GG3633xPEL	(<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. pellita</i>)
AEC2034xLR830	(<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)) x (<i>E. longirostrata</i>)
AEC2034xLR831	(<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)) x (<i>E. longirostrata</i>)
I3000xVM1	(<i>E. camaldulensis</i>) x (<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>)
VM4xCAM	(<i>E. urophylla</i> HE) x (<i>E. camaldulensis</i>)
VM4xTER	(<i>E. urophylla</i> HE x <i>E. tereticornis</i>)
VM7xLON	(<i>E. urophylla</i> HE x <i>E. longirostrata</i>)
VM7xTER	(<i>E. urophylla</i> HE) x (<i>E. tereticornis</i>)
VM1xCAM	(<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>) x (<i>E. camaldulensis</i>)
VM1xVM4	(<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i>) x (<i>E. urophylla</i> HE)

Figura 1: Localização da área experimental em Buritizeiro-MG. O quadrado branco representa a floresta viva com idade de seis anos, antes da ocorrência da seca. A fazenda fica localizada a 10km do leito do rio São Francisco



2.1- Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos, ao longo dos três anos de coleta, foram obtidos da estação n° 545 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na cidade de Pirapora, localizada a 7km de Buritizeiro

Dados de temperatura (máxima, média e mínima) (C°), precipitação (mm.dia⁻¹), umidade relativa média (%), radiação solar global (MJ. m⁻².day⁻¹) foram organizados em escala diária. Para auxiliar na interpretação dos resultados provenientes do estudo, foram determinados os valores de evapotranspiração de referência pelo método de Penman - Monteith (Allen et al., 1998) e déficit de pressão de vapor derivados dos dados diários.

2.2 -Variáveis Morfofisiológicas e Produtividade

As coletas biométricas e fisiológicas foram realizadas anualmente, durante os anos de 2019 a 2021 (6, 18 e 30 meses após o plantio), sempre no

período correspondentes ao final dos ciclos de seca na região (mês de setembro).

2.2.1- Inventário e incremento médio anual

Todas as árvores da parcela foram mensuradas obtendo-se o diâmetro de altura do peito DAP (Equação 1), altura total (m) e mortalidade (%). De posse destes dados o volume de madeira por clone (m³) foi calculado (Equação 2). A partir do volume de madeira, obteve-se o incremento volumétrico médio anual (Imavol, m³. ha⁻¹.ano⁻¹) (Equação 3). Os cálculos foram obtidos através de Soares et al., 2011.

Equação 1: $DAP = \frac{CAP}{\pi}$, em que DAP é o diâmetro a altura do peito a 1,30 metros de altura em relação ao nível do solo; CAP a circunferência a altura do peito e π é a proporção numérica originada da relação entre as grandezas do perímetro de uma circunferência e o seu diâmetro, cujo valor é aproximadamente 3,14 (nesses casos foram utilizados os dados médios do DAP e H de cada conjunto).

$$\text{Equação 2: } V_n = \frac{(\pi \times DAP^2)}{40000} \times H \times 0,45$$

O volume das árvores (Vn) foi calculado com os dados do DAP e altura comercial do fuste (H), em que, Vn = volume da enésima árvore, em m³; DAP = Diâmetro da altura do peito, em cm; $\pi = 3,1416$ (constante); Hn = altura comercial do fuste em m; 40000 = constante; 0,45 (fator de forma).

$$\text{Equação 3: } Ima = \frac{(V_n \times 10.000)}{(9 \times X)}$$

em que: Ima (Incremento médio volumétrico anual; m³. ha⁻¹.ano⁻¹), Vn (volume individual da madeira, m³), 10.000 (valor de 1ha), 9 (espaçamento entre as plantas) e X (idade da plantação, anos)

2.2.2- Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado, na antemanhã (6:00) e ao meio-dia (12:00) com o auxílio de uma Bomba de Scholander em folhas completamente expandidas (3º ou 4º par de folhas) do terço médio da planta.

2.2.3. - Determinação de variáveis morfológicas

Aproximadamente 15 folhas completamente expandidas do terço médio foram coletadas e digitalizadas em scanner (hp ScanJet 200). Em seguida, as folhas foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até atingir massa constante. A área foliar específica (AFE) foi determinada pela razão entre a área foliar (cm^2) e a massa seca (g). As imagens digitalizadas foram mensuradas no Image-Pro Plus® para obtenção da área foliar (AF), comprimento (C) e largura foliar (L).

2.3- Análise estatística

Dados sem normalidade foram transformados e submetidos à análise de variância a 5% de significância e para fins de comparação de médias utilizou-se o teste de Scott-Knott a 5% de significância, ambas realizadas através do software R. Realizou-se a correlação de Pearson a nível de 5% de significância para identificar se houve relações significativas entre as variáveis morfofisiológicas, com auxílio do software R. Análise de Componentes Principais (PCA) foram realizadas com auxílio do software OriginPro 2024.

3.1- Descrição meteorológica da área

A precipitação total, cinco meses após o plantio realizado em março de 2019, alcançou 37mm (Figura 2A). Na segunda coleta, um ano após a primeira, a precipitação pluviométrica acumulada foi de 1277 mm, e na terceira coleta a qual ocorreu em setembro de 2021, foi obtido o valor acumulado de 1023mm de precipitação (Figura 2A). Portanto, o período seco ocorre entre abril e setembro, época na qual a precipitação acumulada não atingiu 100mm em nenhum dos três anos avaliados (Figura 2A). Registra-se também que entre os meses de junho a agosto, os quais são caracterizados como período seco, a precipitação foi nula neste local (Figura 2A).

Em relação à média mensal das temperaturas máximas entre abril a setembro para cada ano avaliado foi de 28,0C°, 23,3C° e 24,4C° (Figura 2B). Entre junho a agosto, três meses anteriores à coleta, a média mensal das temperaturas mínimas para os anos 2019, 2020 e 2021 foram de 16,7 C°, 20,5C° e 21,0 C°, respectivamente (Figura 2B). Nos meses anteriores e posteriores ao inverno durante os três anos, a temperatura mínima variou entre 20 e 24,8C° e a máxima entre 23,8 a 35,2 C° as quais estão dentro da faixa de temperaturas basais, ótimas e máximas cardinais para o desenvolvimento de *Eucaliptus* (Freitas et al., 2017).

Ao se avaliar o período seco, a UR média alcançou baixos valores, atingindo uma média de 56% (Figura 2C). Durante o período seco, foram registrados valores de evapotranspiração de referência (ET_o) muito superiores à precipitação mensal acumulada, o que resultou, em última instância, em déficit hídrico acentuado, nos três anos (Figura 2D).

O valor para ET_o, cinco meses após o plantio, foi de 617,3mm. Em 2020, cinco meses antes da segunda coleta ET_o alcançou 623,5mm e para o mesmo período, em 2021, na terceira coleta, a ET_o atingiu 629,7mm (Figura 2D). Em relação aos anos aqui avaliados, os valores de ET_o não apresentaram diferenças expressivas; porém, ao se avaliar o período seco, observaram-se valores de ET_o muito superiores à precipitação mensal acumulada, o que confirma a ocorrência de déficit hídrico esperado para a época (Tabela 2), em consonância com as coletas ora realizadas.

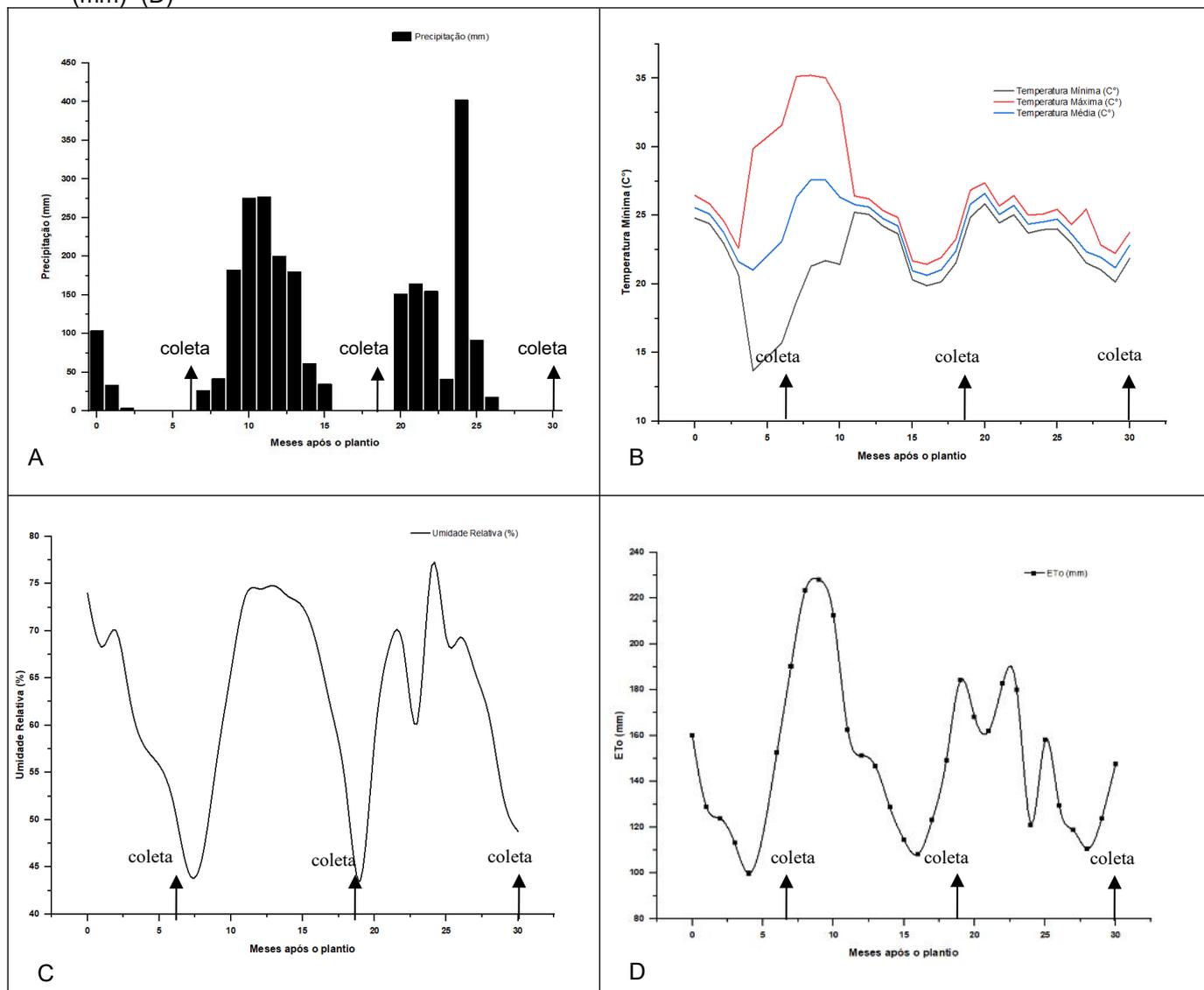
As variáveis climáticas, assim como os valores de incremento médio anual obtidos pelas progênes ($m^{-3} \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$), foram obtidos em cada ano de avaliação (Tabela 2). Para os períodos secos, compreendidos entre abril e setembro, a diferença entre precipitação e ETo foi calculada (Tabela 2). De forma geral, observa-se que a precipitação anual, temperaturas mínimas, médias e Precipitação-Eto, foram relativamente similares entre os três anos aqui avaliados. Não obstante, a temperatura máxima anual foi maior no ano de 2019 ao passo que a umidade relativa foi menor (Tabela 2). Cabe ressaltar que o IMAvol foi também menor nesse mesmo ano. A Figura 2 mostra a evolução das variáveis climáticas no período avaliado compreendido entre março de 2019 a setembro de 2021.

Tab.2: Variáveis meteorológicas e diferença entre Precipitação e ETo para o período entre 2019-2021

Período avaliado (ano)	Precipitação anual (mm)	ETo anual* (mm)	Tmin média anual (C°)	T média anual (C°)	T max média anual (C°)	UR média anual (%)	Precipitação-ETo período seco (abril-setembro) (mm)
2019	996.62	1988.31	21.33	25.02	29.48	61.05	-744.53
2020	1223	1781.07	23.36	24.06	24.79	65.9	-711.35
2021	1198.4	1718.91	23.2	23.98	24.94	63.11	-786.39

***ETo: Evapotranspiração potencial; Tmin: Temperatura mínima; Tmédia: Temperatura média; UR: Umidade relativa; IMAvol: incremento médio de volume**

Figura 2: Evolução das variáveis climáticas, médias obtidas mensalmente após o plantio em março de 2019 até a terceira coleta em setembro de 2021, na região de Buritizeiro-Minas Gerais (17° 05'49" S e 44° 53'09" O). Precipitação(mm) –(A), temperaturas média, mínima e máxima (C°) –(B), Umidade relativa do ar (%) – (C) e evapotranspiração de referência (mm)- (D)



3.2- Avaliações morfológicas

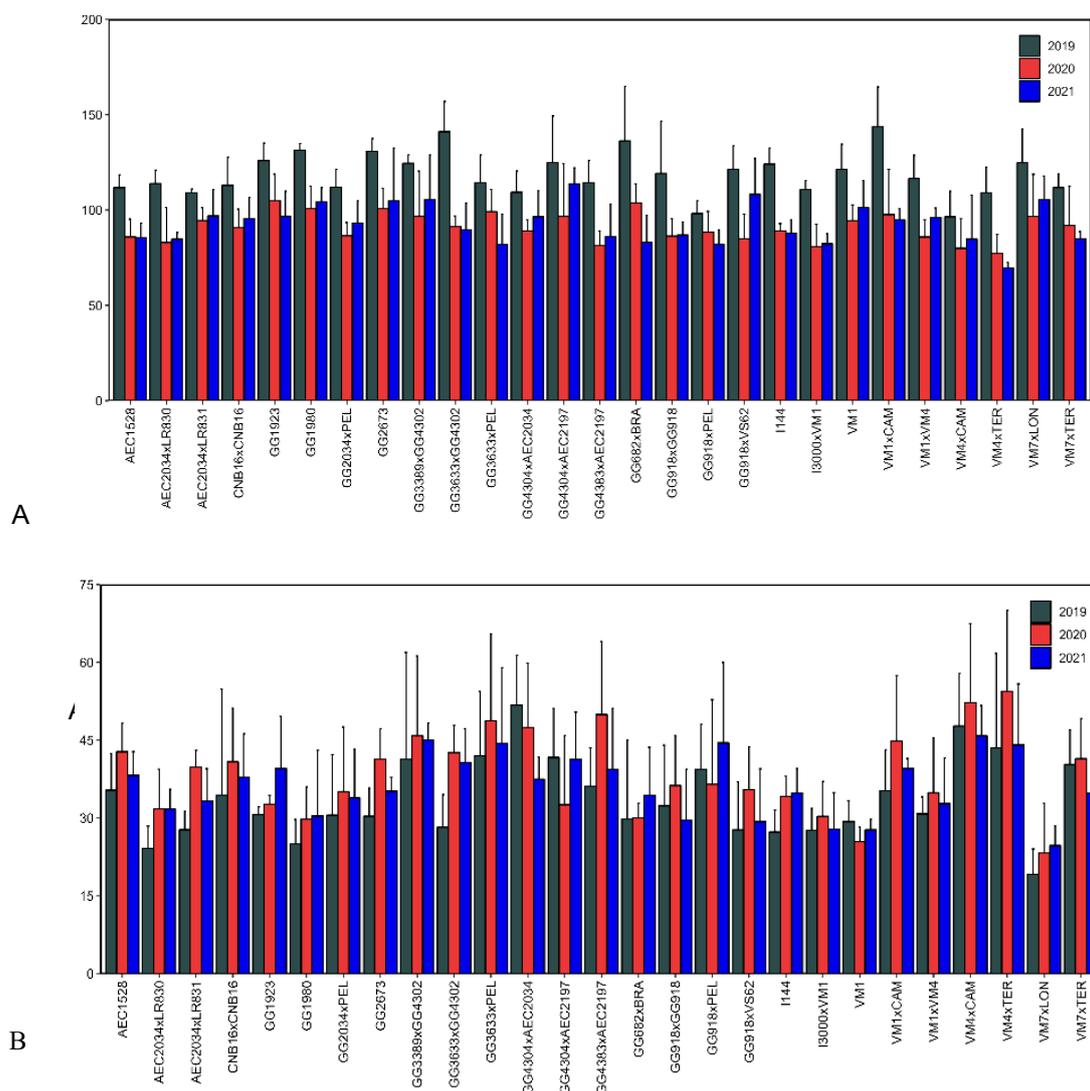
Aos seis meses do plantio, as progênies apresentam área foliar específica (AFE) variando entre 96 a 141 cm² g⁻¹, a área foliar (AF) entre 24 a 51 cm², o comprimento foliar entre 7 a 12 cm, a largura foliar entre 3 a 5 cm ao passo que o potencial hídrico (Ψ_w) apresentou valores variando de -1,85 a -2,44 Mpa (Figura 3). Em 2020, 18 meses após o plantio, todas as progênies reduziram a AFE cujo máximo valor atingido foi de 105,01 cm²g⁻¹. Em relação a AF, alguns materiais genéticos (e.g. GG2673, GG1923, AEC1528, GG918XGG918, CNB16XCNB16) apresentaram aumento ao passo que outras progênies (e.g. GG682XBRA, GG918XPEL e GG4304XAEC2197) apresentaram redução na AF. De modo geral, a maioria dos cruzamentos foram caracterizadas por aumento na AF enquanto somente 15% dos materiais genéticos avaliados apresentaram redução na AF (Figura 3B). Com exceção de duas progênies, todos os materiais genéticos aqui avaliados apresentaram aumentos no comprimento foliar (Figura 3C). Ressalta-se que as duas progênies acima mencionadas, apresentaram uma mínima redução no seu comprimento foliar. Ao se analisar a largura foliar, somente 30% das progênies responderam com aumentos significativos (Figura 3D). Por fim, foram observadas reduções no potencial hídrico (Ψ_w mais negativo) em 22 progênies, ao passo que três (CNB16XCNB16, AEC2024XLR831 e GG3633XPEL) apresentaram valores maiores (Ψ_w menos negativo) e duas (GG2034XPEL e VM1XVM4) conseguiram manter o Ψ_w (Figura 3E).

Ao se comparar o efeito dos anos de coleta, considerando os dados morfológicos referentes ao ano de 2021 (30 meses após o plantio) em relação ao ano 2020, foi possível observar que 15 progênies responderam com um aumento na AFE, ao passo que três conseguiram manter a AFE e o restante apresentou reduções na AFE (Figura 3A). De forma oposta, 15 progênies obtiveram uma redução na AF, um deles conseguiu manter seu valor e os outros 10 cruzamentos restantes apresentaram aumentos na AF (Figura 3B). Foi observada uma redução no comprimento foliar em 15 progênies (Figura 3C), assim como ocorreu na AF (Figura 3B). A largura foliar de 19 dos 27 materiais genéticos aqui avaliados foi reduzida (Figura 3D), ao passo que ao se

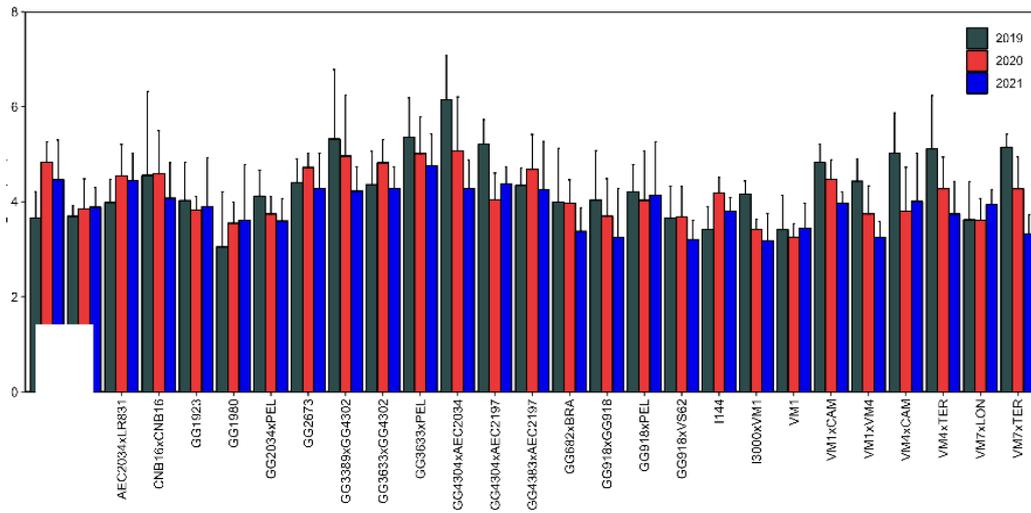
analisar o Ψ_w (Figura 3E), todos os materiais genéticos apresentaram um menor

Ψ_w (mais negativo), o que significa, em última instância, uma menor manutenção do status hídrico ao longo dos períodos aqui avaliados.

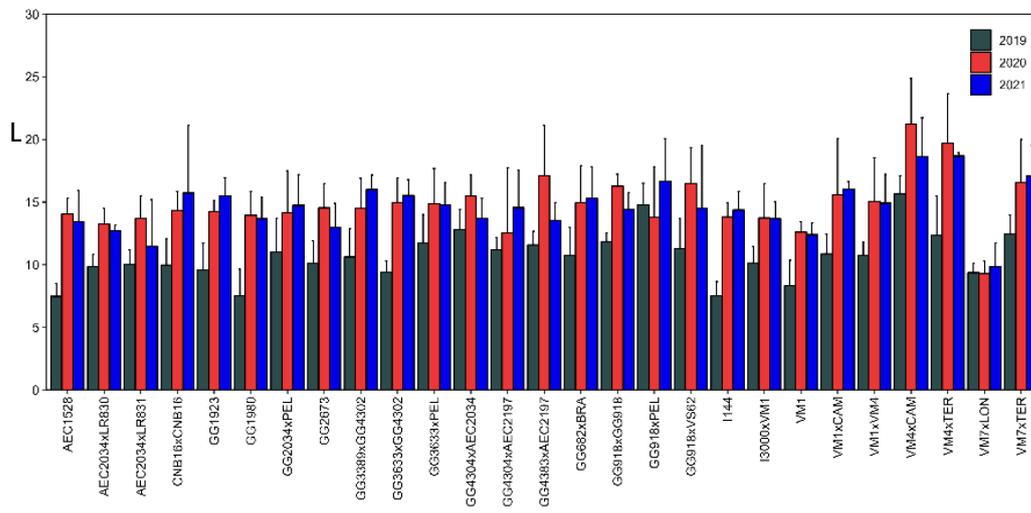
Figura 3: Medidas morfológicas e de potencial hídrico dos 27 materiais genéticos avaliados durante os anos de 2019-2021. (A)-Área foliar específica ($\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$), (B)-Área foliar (cm^2), (C)-Comprimento (cm), (D)-Largura (cm), (E)-Potencial hídrico (Mpa). Houve diferenças significativas ($p < 0,05$) em todas as variáveis morfológicas dentro de cada ano, exceto para Ψ_w , que não diferiu significativamente em 2020 (tabelas 3, 5 e 7).



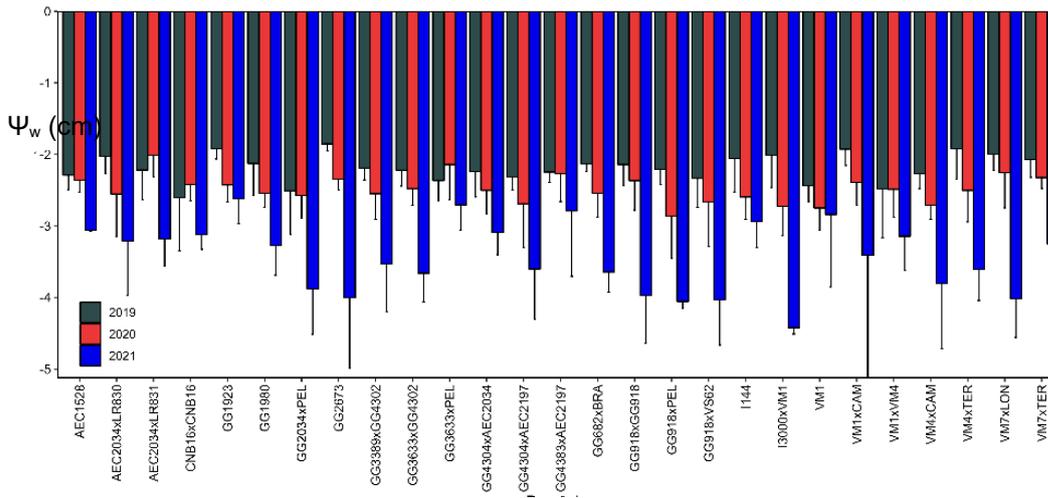
C



D



E



3.2.1 Avaliações morfológicas aos 6 meses

As diferenças observadas para AFE, AF, Comprimento, Largura e Ψ_w dos cruzamentos obtidos encontram-se na Tabela 2. De modo geral, os clones e progênies GG2673, GG1923, VM1, I144, GG1980, GG3633XGG4302, GG682XBRA e VM7XLON apresentaram maior AFE e menores AF, largura e comprimento (Tabela 3). De modo oposto, as progênies GG4304XAEC2034, GG918XPEL, VM4XCAM, VM4XTER e VM7XTER apresentaram menor AFE e maiores AF, largura e comprimento (Tabela 3). Alguns materiais genéticos (e.g AEC2034XLR830, AEC2034XLR831, I3000XVM1) foram caracterizados por menores valores nesses quatro parâmetros, ao passo que as progênies GG3389XGG4302, GG682XBRA e VMIXCAM exibiram valores elevados (Tabela 3).

Os clones e progênies GG2673, GG1923, I144, GG1980, GG918XGG918, GG682XBRA, AEC2034XLR830, I300XVM1, VM4XTER, V7XLON, VM7XTER e VM1XCAM apresentaram os maiores Ψ_L (menos negativo), em relação aos outros materiais genéticos para o mesmo ano, o que pode indicar manutenção do *status* hídrico (Tabela 3). De modo contrário, materiais genéticos como VM1, AEC1528, GG3389XGG4302, GG918XVS62, GG4304XAEC2034, CNB16XCNB16, GG4383XAEC2197, GG3633XGG4302, GG4304XAEC2197, GG2034XPEL, GG918XPEL, GG3633XPEL, AEC2034XLR831, VM4XCAM e VM1XVM4 exibiram os menores Ψ_w (valores mais negativos).

Tabela 3: Área foliar específica (AFE, $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$), Área foliar (AF, cm^2), Comprimento (C, cm), Largura (L, cm) e potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_w , MPa) de diferentes clones e progênies, aos 6 meses, cultivados em campo com elevada restrição hídrica em Buritizeiro-MG.

CRUZAMENTOS/PROGÊNIES	AFE	AF	C	L	Ψ_w
GG2673	130.76	B 30.33	B 10.13	C 4.41	B -1.85
GG1923	125.88	B 30.62	B 9.57	C 4.03	B -1.92
VM1	121.24	B 29.30	B 8.31	C 3.41	B -2.44
AEC1528	111.72	C 35.36	B 7.47	C 3.66	B -2.29
I144	124.07	B 27.29	B 7.51	C 3.42	B -2.06
GG1980	131.48	B 25.03	B 7.51	C 3.05	B -2.13
GG3389xGG4302	124.53	B 41.32	A 10.62	C 5.32	A -2.19
GG918xGG918	119.24	C 32.34	B 11.84	B 4.03	B -2.14
GG918xVS62	121.27	B 27.72	B 11.30	B 3.65	B -2.34
GG4304xAEC2034	109.32	C 51.74	A 12.79	C 6.15	A -2.24
CNB16xCNB16	112.90	C 34.44	B 9.97	C 4.56	B -2.61
GG4383xAEC2197	114.42	C 36.17	B 11.58	B 4.34	B -2.25
GG3633xGG4302	141.10	A 28.21	B 9.42	C 4.36	B -2.22
GG4304xAEC2197	124.93	B 41.67	A 11.20	B 5.21	A -2.32
GG2034xPEL	112.05	C 30.55	B 11.00	C 4.12	B -2.51
GG682xBRA	136.28	A 29.80	B 10.74	C 3.99	B -2.13
GG918xPEL	98.16	C 39.41	A 14.78	A 4.21	B -2.21
GG3633xPEL	114.27	C 41.95	A 11.72	B 5.36	A -2.37
AEC2034xLR830	113.92	C 24.17	B 9.84	C 3.69	B -2.03
AEC2034xLR831	109.10	C 27.74	B 10.02	C 3.98	B -2.22
I3000xVM1	110.73	C 27.59	B 10.14	C 4.16	B -2.02
VM4xCAM	96.45	C 47.74	A 15.65	A 5.03	A -2.27
VM4xTER	109.13	C 43.56	A 12.33	B 5.11	A -1.92
VM7xLON	124.76	B 19.17	B 9.36	C 3.62	B -2.00
VM7xTER	111.75	C 40.33	A 12.47	B 5.15	A -2.07
VM1xCAM	143.87	A 35.30	B 10.87	C 4.83	A -1.93
VM1xVM4	116.48	B 30.80	B 10.74	C 4.43	B -2.48

Letras maiúsculas denotam diferenças significativas entre os clones de acordo com o Teste de Scott-Knott de probabilidade ($P<0,05$)

Correlação significativa e negativa foi observada entre AFExC ($r=-0,41$; $P=<0,001$) em que menores valores de AFE são acompanhados por maiores comprimentos foliar. Destaca-se, ainda, correlações positivas e significativas entre AFxC ($r=0,71$; $P=0$) e AFxL ($r=0,83$; $P=0$) e assim, plantas com maior AF apresentam maior C e L. A correlação entre CxL ($r= 0,66$; $P=0$) também foi significativa e positiva, indicando a existência de incrementos no comprimento à medida que a largura aumenta. Em relação ao Ψ_w , nenhuma correlação significativa foi observada (Tabela 4).

Tabela 4: Análises de correlação de Pearson para AFE ($\text{cm}^2\text{ g}^{-1}$), AF (cm^2), C (cm), L (cm) e de potencial hídrico foliares (Ψ_w MPa) em plantios aos 6 meses de cultivo em campo. Diferenças estatísticas foram observadas a 5% de probabilidade ($p<0,05$).

		2019									
	AFEXAF	AFEXC	AFEXL	AFEX Ψ_w	AFXC	AFXL	AFX Ψ_w	CXL	CX Ψ_w	LX Ψ_w	
<i>r</i>	-0.28	-0.41	-0.18	0.09	0.72	0.83	0.05	0.66	0.02	0.06	
<i>p</i>	0,0002	<0,0001	0,018	0,25	0	0	0,5	0	0.78	0.44	

3.2.2 Avaliações morfológicas aos 18 meses

Ao se avaliar o comportamento dos caracteres morfológicos dos cruzamentos obtidos 18 meses após o plantio uma ampla gama de respostas foi observada (Tabela 5). Clones e progênies como GG1923, VM1, GG1980, GG4304XAEC2197, GG682XBRA e VM7XLON apresentaram maiores AFE e menores AF, C e L foliar (Tabela 5). Por outro lado, GG4304XAEC2034, CNB16XCNB16, GG4383XAEC2197 e VM4XTER apresentaram menores AFE e maiores AF, C e L foliar (Tabela 3). Alguns materiais genéticos (e.g., GG2673, GG3389XGG4302, GG3633XPEL, VM7XTER e VM1XCAM) apresentaram maiores valores em todas as quatro variáveis morfológicas. De modo oposto, alguns clones e progênies (e.g. GG2034XPEL, GG918XPEL, AEC2034XLR830 e I3000XVM1) exibiram menores valores em AFE, AF, C e L foliar. Em relação ao Ψ_w , os clones e progênies, avaliados 18 meses após o plantio, não apresentaram diferença significativa entre eles (Tabela 5).

Tabela 5: Área foliar específica (AFE, $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$), Área foliar (AF, cm^2), Comprimento (C, cm), Largura (L, cm) e potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_w , MPa). de diferentes clones e progênies, aos 18 meses, cultivados em campo com elevada restrição hídrica em Buritizeiro-MG.

CRUZAMENTOS/PROGÊNIES	AFE	AF	C	L	Ψ_w
GG2673	100.81 A	41.34 A	14.54 C	4.72 A	-2.35 NS
GG1923	105.01 A	32.69 B	14.24 C	3.82 B	-2.43 NS
VM1	94.51 A	25.48 B	12.46 C	3.25 B	-2.64 NS
AEC1528	85.89 B	42.77 A	14.04 C	4.84 A	-2.36 NS
I144	87.66 B	33.40 B	13.82 C	4.18 B	-2.60 NS
GG1980	100.81 A	29.75 B	13.94 C	3.55 B	-2.54 NS
GG3389xGG4302	99.35 A	48.30 A	14.50 C	4.96 B	-2.55 NS
GG918xGG918	86.35 B	36.26 B	16.27 B	3.70 B	-2.37 NS
GG918xVS62	84.95 B	35.50 B	16.49 B	3.68 B	-2.67 NS
GG4304xAEC2034	89.10 B	47.45 A	15.48 C	5.07 A	-2.50 NS
CNB16xCNB16	90.89 B	40.83 A	14.32 C	4.60 A	-2.42 NS
GG4383xAEC2197	81.49 B	49.95 A	17.10 B	4.68 A	-2.27 NS
GG3633xGG4302	91.24 B	42.58 A	14.96 C	4.82 A	-2.48 NS
GG4304xAEC2197	96.84 A	32.56 B	12.53 C	4.04 B	-2.69 NS
GG2034xPEL	86.51 B	35.09 B	14.15 C	3.74 B	-2.58 NS
GG682xBRA	103.63 A	30.03 B	14.93 C	3.97 B	-2.54 NS
GG918xPEL	88.31 B	36.49 B	13.79 C	4.03 B	-2.87 NS
GG3633xPEL	99.23 A	48.77 A	14.88 C	5.01 A	-2.14 NS
AEC2034xLR830	76.76 B	33.42 B	13.42 C	3.95 B	-2.36 NS
AEC2034xLR831	94.55 A	39.85 A	13.69 C	4.55 A	-2.02 NS
I3000xVM1	80.65 B	30.32 B	13.74 C	3.42 B	-2.73 NS
VM4xCAM	79.90 B	52.24 A	21.24 A	3.81 B	-2.71 NS
VM4xTER	77.41 B	54.44 A	19.68 A	4.27 A	-2.50 NS
VM7xLON	96.78 A	23.30 B	9.28 C	3.62 B	-2.25 NS
VM7xTER	91.84 B	41.43 A	16.55 B	4.27 A	-2.32 NS
VM1xCAM	97.60 A	44.90 A	15.57 C	4.48 A	-2.39 NS
VM1xVM4	85.19 B	32.25 B	15.28 C	3.77 B	-2.48 NS

Letras maiúsculas denotam diferenças significativas entre os clones de acordo com o Teste de Scott-Knott de probabilidade ($P < 0,05$)

Análise de correlação de Pearson (r) (Tabela 6) também foi realizada para o ano de 2020 e interações significativas foram encontradas em AFExC ($r = -0,37$, $P = < 0,00001$), AFxC ($r = 0,67$, $P = 0$), AFxL ($r = 0,69$, $P = 0$) e CxL ($r = 0,18$, $P = 0,026$). Correlação negativa foi observada em AFExC em que menores AFE são acompanhadas por maiores C foliar. Destaca-se que a AF se correlaciona positivamente com o C e L foliar, em que plantas com maior AF exibem maiores C e L foliar (Tabela 6).

Tabela 6: Análises de correlação de Pearson para variáveis morfológicas (AFE ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), AF (cm^2), C (cm), L (cm) e de potencial hídrico foliares (Ψ_w MPa) em plantios aos 18 meses de cultivo em campo. Diferenças estatísticas foram observadas a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

		2020								
	AFEXAF	AFEXC	AFEXL	AFEX Ψ_w	AFXC	AFXL	AFX Ψ_w	CXL	CX Ψ_w	LX Ψ_w
<i>r</i>	-0.14	-0.37	0.11	-0.18	0.67	0.69	0.11	0.18	0.03	0.08
<i>p</i>	0,09	<0,00001	0.17	0,03	0	0	0.21	0.026	0.65	0.33

3.2.3 -Avaliações morfológicas aos 30 meses

Ao se avaliar os caracteres morfológicos aos 30 meses, clones e progênies VM1, GG1980 e VM7XLON apresentaram maiores valores de AFE e menores AF, C e L foliar (Tabela 7). De modo contrário, os cruzamentos GG3633XGG4302, GG918XPEL, GG3633XPEL e VM4XCAM apresentaram menores AFE e maiores AF, C e L foliar (Tabela 7). Materiais genéticos como GG1923, GG3389XGG4302, CNB16XCNB16, GG4304XAEC2197 e VM1XCAM exibiram maiores valores nessas quatro variáveis morfológicas avaliadas (Tabela 7). Com efeito, a progênie I3000XVM1 apresentou menores valores (Tabela 7).

Materiais genéticos como GG1923, VM1, AEC1528, I144, GG1980, GG4304XAEC2034, CNB16XCNB16, GG4383XAEC2197, VM7XTER, VM1XCAM e VM1XVM4 apresentaram maiores Ψ_w (valores menos negativos) (Tabela 7). Por outro lado, clones e progênies como GG2673, GG3389XGG4302, GG918XGG918, GG918XVS62, GG3633XGG4302, GG4304XAEC2197, GG2034XPEL, GG682XBRA, GG918XPEL, I3000XVM1, VM4XCAM, VM4XTER e VM7XLON apresentaram menores Ψ_w (Tabela 7).

Tabela 7: Área foliar específica (AFE, $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$), Área foliar (AF, cm^2), Comprimento (C, cm), Largura (L, cm) e potencial hídrico foliar ao meio-dia (Ψ_w , MPa) de diferentes clones e

progênies, aos 30 meses, cultivados em campo com elevada restrição hídrica em Buritizeiro-MG.

CRUZAMENTOS/PROGENIES	AFE	AF	C	L	Ψ_w
GG2673	104.81	A 35.15 B	12.98 C	4.28 A	-4.00 B
GG1923	96.84	A 39.53 A	15.48 B	3.90 A	-2.62 A
VM1	101.28	A 27.73 B	12.40 C	3.45 B	-2.84 A
AEC1528	85.43	B 38.22 A	13.45 C	4.46 A	-3.06 A
I144	87.84	B 34.86 B	14.37 B	3.80 B	-2.94 A
GG1980	104.29	A 30.37 B	13.67 C	3.61 B	-3.28 A
GG3389xGG4302	105.63	A 45.05 A	16.00 B	4.22 A	-3.53 B
GG918xGG918	86.93	B 29.59 B	14.43 B	3.25 B	-3.97 B
GG918xVS62	108.23	A 29.29 B	14.50 B	3.21 B	-4.03 B
GG4304xAEC2034	96.46	A 37.50 A	13.72 C	4.28 A	-3.09 A
CNB16xCNB16	95.61	A 37.92 A	15.72 B	4.08 A	-3.12 A
GG4383xAEC2197	86.08	B 39.39 A	13.54 C	4.26 A	-2.79 A
GG3633xGG4302	89.69	B 40.69 A	15.53 B	4.28 A	-3.66 B
GG4304xAEC2197	113.73	A 41.30 A	14.55 B	4.38 A	-3.60 B
GG2034xPEL	93.21	A 33.87 B	14.73 B	3.60 B	-3.88 B
GG682xBRA	82.99	B 34.40 B	15.29 B	3.38 B	-3.64 B
GG918xPEL	82.15	B 44.49 A	16.66 B	4.14 A	-4.06 B
GG3633xPEL	82.03	B 44.39 A	14.77 B	4.76 A	-2.71 A
AEC2034xLR830	84.70	B 31.71 B	12.72 C	3.89 A	-3.21 A
AEC2034xLR831	96.96	A 33.29 B	11.49 D	4.45 A	-3.18 A
I3000xVM1	82.29	B 27.81 B	13.67 C	3.18 B	-4.42 B
VM4xCAM	84.74	B 45.84 A	18.65 A	4.01 A	-3.80 B
VM4xTER	69.60	B 44.07 A	18.67 A	3.74 B	-3.61 B
VM7xLON	105.44	A 24.69 B	9.86 D	3.94 A	-4.02 B
VM7xTER	85.01	B 34.84 B	17.07 B	3.32 B	-3.25 A
VM1xCAM	94.79	A 39.53 A	16.03 B	3.98 A	-3.41 A
VM1xVM4	96.19	A 32.76 B	14.91 B	3.25 B	-3.14 A

Letras maiúsculas denotam diferenças significativas entre os clones de acordo com o Teste de Scott-Knott de probabilidade ($P<0,05$)

Assim como nas avaliações anteriores, análise de correlação de Pearson (r) (Tabela 8) foi realizada revelando, assim, que variáveis como AFExAF, AFExC, AFExL e AFxC apresentaram interações significativas. Uma correlação positiva foi evidenciada entre AFExC ($r=0,63$, $P<0,00001$) e AFExL ($r=0,66$, $P=0$), demonstrando que maiores valores de AFE são acompanhados por maiores C e L foliar. De modo oposto aos anos anteriores, uma correlação negativa foi observada entre AFxC ($r=-0,41$, $P<0,00001$) e, assim, plantas com maior AF apresentam menores C foliar. Em relação ao Ψ_w , nenhuma correlação significativa foi observada (Tabela 8).

Tabela 8: Análises de correlação de Pearson para variáveis morfológicas AFE ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$), AF (cm^2), C (cm), L (cm) e de potencial hídrico foliares (Ψ_w MPa) em plantios aos 30 meses de cultivo em campo. Diferenças estatísticas foram observadas a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

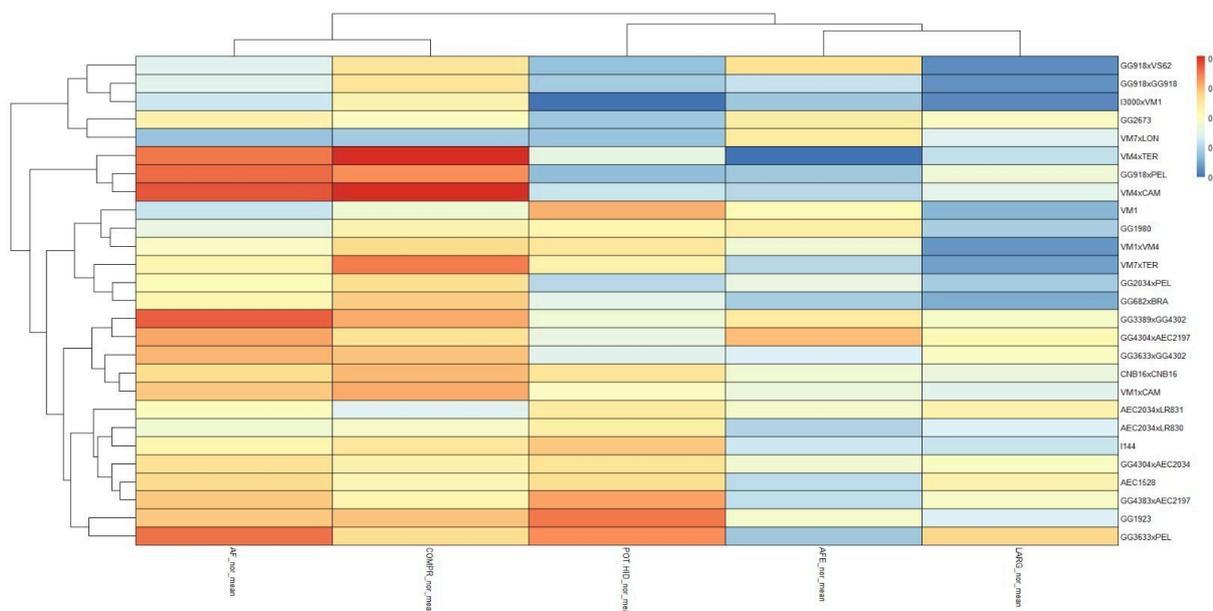
		2021								
	AFEXAF	AFEXC	AFEXL	AFEX Ψ_w	AFXC	AFXL	AFX Ψ_w	CXL	CX Ψ_w	LX Ψ_w
<i>r</i>	-0.18	0.63	0.66	-0.01	-0.41	0.17	-0.17	-0.1	-0.012	0.003
<i>p</i>	0.06	<0.00001	0	0.88	<0.00001	0.07	0.07	0.27	0.9	0.97

3.3- Correlação entre clones/progênes e variáveis morfofisiológicas

A Figura 4 apresenta um heatmap para o ano de 2021 separando os clones e progênes em grupos contendo características similares em função das variáveis morfológicas aqui analisadas. Após a normalização dos dados, é possível visualizar quatro grandes grupos os quais as variáveis morfológicas com maiores valores estão representadas com cores vermelhas enquanto as variáveis de menores valores são representadas por cores azuis. Progênes como GG3389X4302 e GG4304XAEC2197 apresentaram maiores valores para AF e AFE e menores para Ψ_w . De forma oposta, clones e progênes como VM7XTER e AEC2034XLR830 obtiveram menores valores para AF e AFE e maiores para Ψ_w .

O gráfico também permite a visualização de clones e progênes com valores e características morfológicas semelhantes, o qual é possível na formação de grupos. Como exemplo, as progênes GG918XPEL e VM4XCAM apresentaram AF, AFE, e largura bem próximos sendo exibidos pelo padrão de cores semelhantes nas colunas do Heatmap.

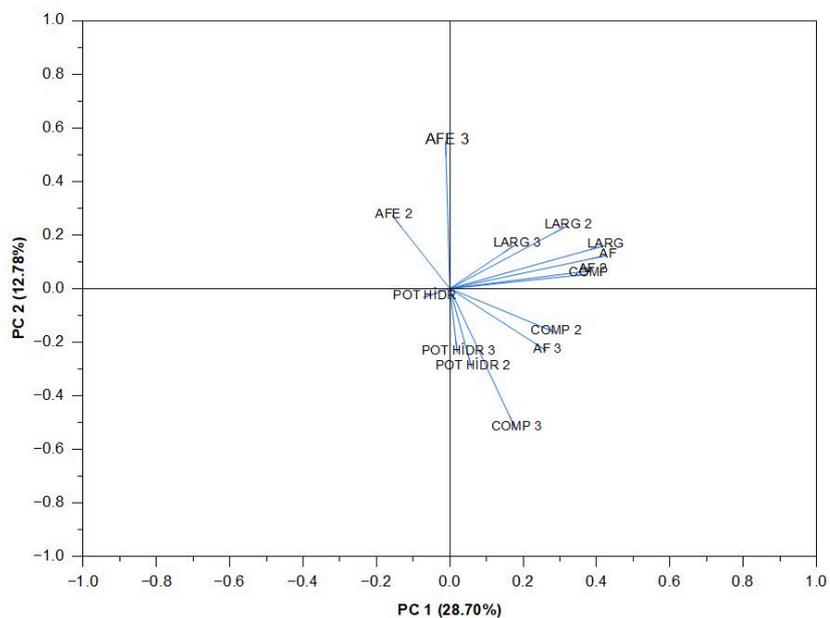
Figura 4- Gráfico de correlação (Heatmap) entre as variáveis morfológicas e os materiais genéticos para o ano de 2021. Cores mais fortes indicam maiores valores da variável



em cada clone/progênie. Claustres foram formados para agrupar clones e progênies com características semelhantes.

Os dados morfofisiológicos foram ainda submetidos a análise de componentes principais (PCA) verificando-se que os dois primeiros componentes (PC1 e PC2) representam 41,5% da variância total dos dados (Figura 5). Assim, PC1 foi responsável por 28,7% pela variação total em que a AF (2019), C (2019) e AF2 (2020) foram as variáveis que mais contribuíram. Em contrapartida, a AFE3 (2021), C3 (2021) e o potencial hídrico (2020) contribuíram para maior variação ao longo do PC2 (12,78%).

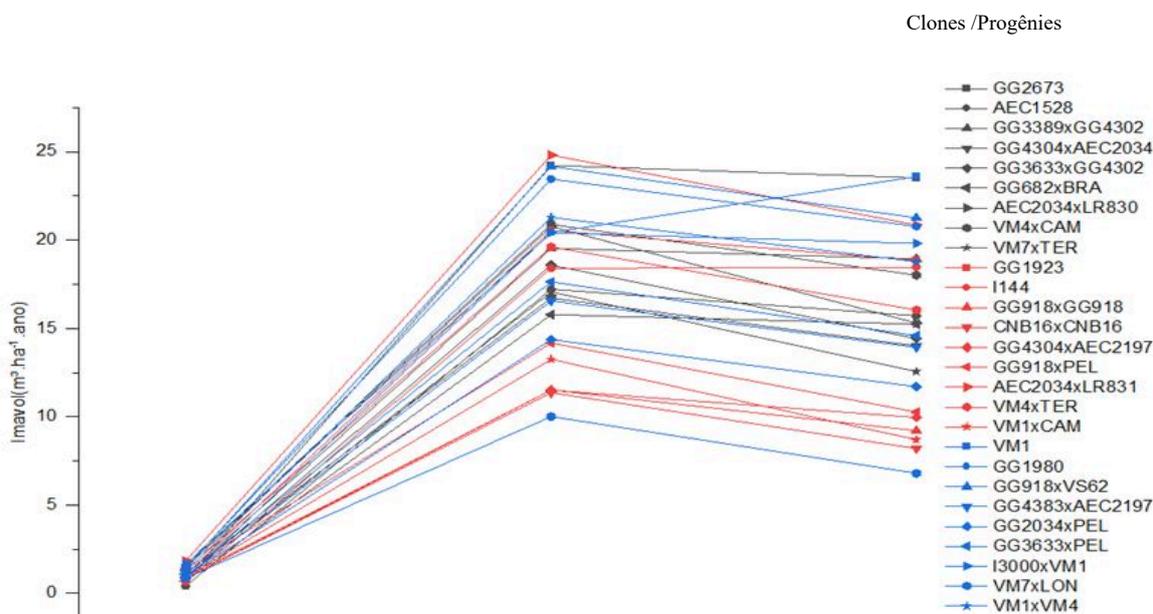
Figura 5- Análise de componentes principais (PCA) baseada em dados morfológicos e potencial hídrico obtidos de clones e progênies de eucalipto de 2019 a 2021.



3.4 - Produtividade e variáveis climáticas

A produtividade das progênes foi caracterizada por diferentes respostas ao longo dos anos aqui avaliados. De acordo com inventário, no ano de 2019 (6 meses após a coleta), o incremento médio anual das progênes variou de 0,38 a 1.53 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (Figura 6). Para o ano de 2020, 18 meses após o plantio, houve um aumento do IMAvol, com valores variando entre 8.96 a 24.22 $\text{m}^3 \text{há}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (Figura 6). As progênes GG2673, GG1980, GG918XVS62, AEC2034XLR830, AEC2034XLR831 e VM4XCAM apresentaram os maiores valores de incremento anual de produtividade. Dentre essas, as progênes GG2673 e GG1980 foram também caracterizadas por maiores valores de AFE e Ψ_w (Figura 6), e a progênie VM4xCAM apresentou maiores valores de AF e largura (Figura 6), os quais se apresentam como indicativos de estratégias para tolerância a deficiência hídrica. Ao analisar as respostas morfológicas para o ano de 2021, 30 meses após o plantio, observou-se uma redução do IMAvol na maioria das progênes, exceto para a VM1 (Figura 6, Tabela 9). Os materiais genéticos GG2673, VM1, GG1980, GG3389XGG4302, GG918XVS62, AEC2034XLR831, I3000XVM1 e VM4XCAM apresentaram maiores valores de IMAvol (Figura 6, Tabela 9). Essas mesmas progênes também obtiveram aumento na AFE para o mesmo período (Tabela 7, Figura 6). De modo geral, o incremento médio das progênes para os anos 2019, 2020 e 2021 foram de 0,88 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, 16,8 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e 14,55 $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ respectivamente (Figura 6).

Figura 6: Evolução do IMAvol médio ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) de cada clone/progênie (representado por símbolos) obtidos nas coletas aos 6, 18 e 30 meses após o plantio de eucalipto.

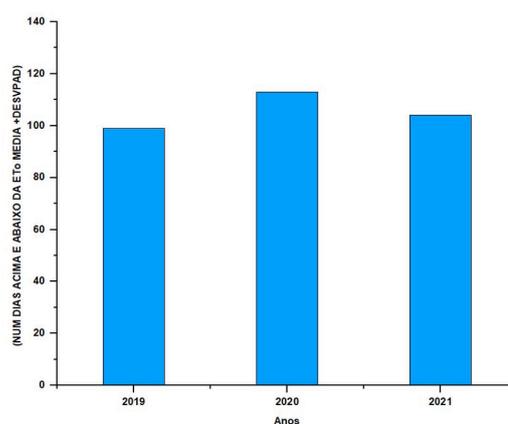
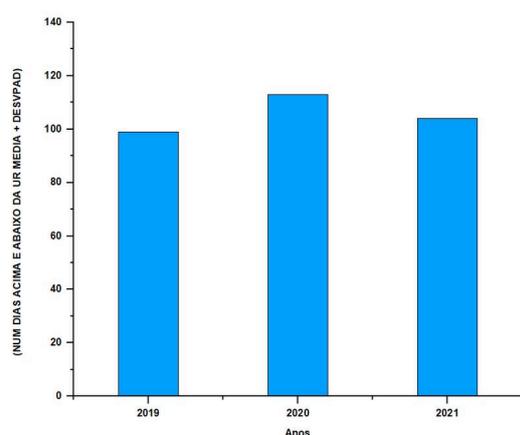
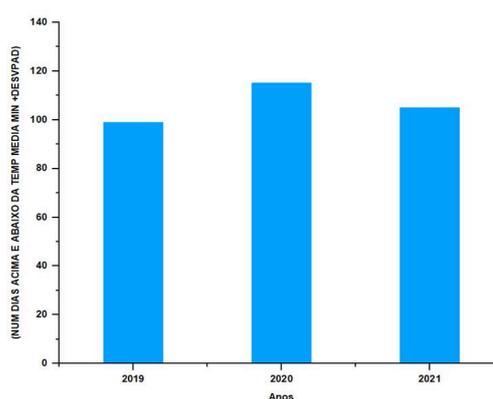
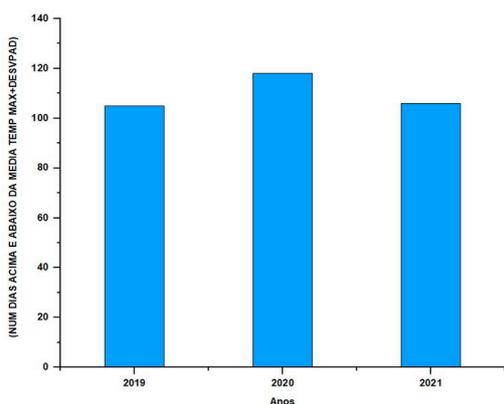


Valores da variabilidade climática ocorrida nos anos avaliados foram também obtidos apresentando o número de dias (período compreendido entre janeiro a setembro). acima e abaixo dos valores médios de temperatura (máxima e mínima), umidade relativa e evapotranspiração somados ao desvio (Figura 7). Dessa forma, foram avaliados o período correspondente aos 6 meses anteriores à coleta. Com base nos dados analisados, o ano de 2020 foi o de maior variabilidade nos dias com somatório de dias acima e abaixo da média (mais desvio padrão) das variáveis meteorológicas (Figura 7). Cabe ressaltar também que, simultaneamente, o ano de 2020 representa também o ano em que a AFE foi reduzida em todas as progênies (Tabela 5).

Figura 7: Somatório do número de dias acima e abaixo da média de variáveis climáticas mais desvio padrão do período seco para os anos de 2019-2021. Figura a - variabilidade da temperatura máxima, figura b-variabilidade da temperatura mínima, figura c-variabilidade da umidade relativa e figura d- variabilidade da evapotranspiração de referência (Eto)

a

b



c

d

4. DISCUSSÃO

Compreender a influência da seca na plasticidade fenotípica do eucalipto é importante não apenas para selecionar materiais genéticos de forma precoce, mas também com vistas a otimizar a produtividade em ambientes sob restrição hídrica. A presente proposta buscou avaliar as mudanças morfofisiológicas que podem atuar como potenciais bioindicadores de tolerância à seca em clones e progênies de eucalipto. Ao mensurar os efeitos da variabilidade climática na produtividade de eucalipto no Brasil, foi demonstrado que a variabilidade climática sazonal interfere no incremento de biomassa anual e o rendimento final (Elli et al., 2020). Em consonância com os resultados aqui discutidos, esses autores demonstraram que, em regiões tropicais caracterizadas pela alternância de estação seca e chuvosa, o teor de

água no solo em conjunto com altas temperaturas exercem maior influência no IMAvol, ao passo que a variação sazonal da temperatura afeta mais as regiões subtropicais, como exemplo, o estado de Minas Gerais com alto índice de déficit hídrico.

Algumas populações de eucaliptos podem apresentar mudanças nas características que podem ser conduzidas pela adaptação genética ou através da plasticidade fenotípica para garantir a sobrevivência sob condições adversas. em um estudo conduzido por Pritzkow et al., 2020 em viveiro com mudas de eucaliptos, observaram que mudanças na anatomia e morfologia foliar foram reguladas geneticamente enquanto características fisiológicas apresentaram plasticidade fenotípica. Alguns estudos apresentaram variação genotípica intraespecífica em características fisiológicas (Knutzen et al. 2015), morfológicas (Benomar et al., 2015; Schuldt et al., 2016) e anatômicas do xilema (Hajek et al. 2016).

Embora a maioria das pesquisas atuais se concentre na compreensão das diferenças interespecíficas nas características funcionais das árvores e nas implicações para a resistência à seca (Anderegg et al., 2016; Choat et al., 2018; Johnson et al., 2018; Li et al., 2018 e Pritzkow et al., 2020), sob estresse hídrico, as plantas tendem a mudar o direcionamento de seus fotoassimilados para diferentes compartimentos para manterem o crescimento. As plantas mantidas sob baixo potencial hídrico tendem a destinar os recursos para as partes estruturais como madeira, resultando em menor diâmetro de vasos e maior densidade a fim de evitar o colapso do xilema (Hacke et al., 2001 ; Searson et al., 2004; Onoda et al., 2010 e Oyanoghafo et al., 2023).

Rosner et al., 2016; Greenwood et al., 2017 e Oyanoghafo et al., 2023 afirmaram que a madeira é considerada um elemento funcional e importante indicador de resistência a seca. Oyanoghafo et al., 2023 em seu experimento determinaram que a densidade da madeira tem origem plástica e quanto mais limitante o fornecimento hídrico, maior o investimento em tecidos estruturais para sobreviver às condições de seca. Em um trabalho realizado por Greenwood et al., 2017, obtiveram menores taxas de mortalidade em espécies de árvores com madeira mais densa e menor área foliar específica. Pesquisas semelhantes foram relatadas com a limitação de água atuando como

determinante da densidade da madeira, retratada como reforço mecânico e estrutural para evitar a cavitação do xilema resultante da redução do potencial hídrico (Hacke et al., 2001; Searson et al., 2004; Onoda et al., 2010 e Oyanoghafo et al., 2023).

De acordo com Stotz et al., 2021, a variabilidade climática tem pouca influência para determinar padrões de plasticidade fenotípica em uma escala mais ampliada, sendo necessário reconhecer outros fatores que não sejam de origem climática. Pesquisas sobre padrões de respostas fenotípicas com destaque em pontos não abordados é fundamental para compreender a capacidade da planta em adaptar-se às mudanças climáticas (Matesanz et al., 2010; Valladares et al., 2014; Stotz et al., 2021).

Mudanças em aspectos fisiológicos das plantas, incluindo a manutenção do Ψ_w , ocorrem quando há baixa disponibilidade hídrica no solo, em que a redução da condutância estomática e a transpiração minimizam a perda de água (Rocha et al., 2020). Os resultados aqui obtidos demonstram que há uma redução no Ψ_w dos materiais genéticos ao longo das épocas avaliadas possivelmente como estratégia para evitar perda de água sob condições de elevado déficit hídrico. Cumpre ressaltar também que algumas progênies apresentaram Ψ_w mais negativos em relação às outras sugerindo um comportamento diferencial frente à limitação hídrica, conforme previamente observado em outros trabalhos (Correia et al., 2018; Müller et al., 2020; Pritzkow et al., 2020 e Ferreira et al., 2023).

Alguns clones e progênies (e.g. I144, GG918XGG918, AEC2034XLR830 e I3000XVM1) apresentaram menores valores tanto na AFE quanto na AF nos três anos avaliados e foram caracterizados por comportamentos de tolerância à seca bastante similares; contudo, a progênie GG918XGG918 exibiu o menor IMAvol em relação aos outros materiais genéticos, sendo, possivelmente, a sensibilidade ao déficit hídrico uma característica própria deste material genético (Tabelas 3, 5, e 7 e Figura 6). Foi previamente demonstrado que, mesmo sob recursos disponíveis para crescimento do volume e área foliar, a genética parece exercer papel importante na interação com ambiente em eucalipto (Rubilar et al., 2020); neste

conteúdo, a interação genética x ambiente apresenta-se como fundamental para a seleção de genótipos em ambientes com restrição.

O déficit hídrico promove não apenas a queda de folhas, mas também dificulta o surgimento de novas folhas e, como consequência, promove, em última instância, a redução do número de folhas e da área foliar (Kapoor et al., 2020). A área foliar reduzida diminui a superfície transpiracional para otimizar o uso da água e evitar perdas por transpiração; com efeito, a queda do conteúdo de água das folhas pode causar o fechamento dos estômatos como forma de manutenção do status hídrico (Deka et al., 2018; Bangar et al., 2019). Reduções na área foliar em clones de eucaliptos em resposta ao déficit hídrico tem sido relatado (Fernandes et al., 2013; Silva et al., 2016 e Pereira et al., 2018).

Progênes como VM4XCAM e VM4XTER apresentaram menores AFE e maiores AF nos três anos (Tabelas 3, 5 e 7) além de queda no IMAvol acumulado no terceiro ano (Figura 5). De modos semelhantes aos resultados aqui apresentados, reduções na AFE em genótipos de *E. camadulensis* avaliados sob déficit hídrico a curto prazo foram observadas (Amrutha et al., 2019). A diminuição da precipitação ocasiona, geralmente, uma redução no tamanho da folha o que pode estar associado também com diminuição da AFE e aumento na espessura das folhas (Fletcher et al., 2018); no entanto, essa relação não foi observada no presente estudo e é sustentada pelo trabalho realizado por Xu et al., 2020.

A progênie GG3389XGG4302 apresentou maiores AFE, AF, largura e menores Ψ_w a partir do segundo ano avaliado (Tabelas 5 e 7), sugerindo que mesmo com menores valores de Ψ_w , ajustes na largura e AF também contribuíram para menor perda em IMAvol. De modo similar, o clone GG2673 apresentou maior acúmulo de IMAvol em relação a todos os clones e progênes (Figura 6); porém, ao analisar as características morfológicas e fisiológicas, pode-se observar maiores AFE, largura e redução do Ψ_w nos dois anos subsequentes ao plantio.

Clones e progênes como VM1, GG1980 e VM7XLON foram caracterizadas por maiores AFE e menores AF nos dois períodos após plantio, porém, o clone VM1 apresentou aumento no IMAvol no último período avaliado,

ao passo que a progênie VM7XLON além da redução, apresentou também menor valor de IMAvol para o ano de 2021 (Figura 5). Vale destacar que a progênie VM7XLON apresentou menores Ψ_w no último período avaliado, ao contrário dos clones VM1 e GG1980 (Tabela 7). As progênies GG918XVS62 e VM1XVM4 apresentaram um comportamento semelhante no que diz respeito a ajustes de AFE e foram caracterizadas por um aumento dessa variável no terceiro ano com menor perda de IMAvol. Para o clone GG1923, a AFE se manteve constante nos períodos de 2020 e 2021 e além do aumento na AF no último ano, o Ψ_w permaneceu maior nos três períodos, explicando, ainda que parcialmente, a pequena perda de IMAvol observada para este genótipo (Tabelas 5 e 7 e Figura 6).

Correia et al., 2018 e Muller et al., 2020, ao avaliarem clones de eucalipto sob déficit hídrico, observaram que plantas mais sensíveis à seca obtiveram maiores reduções no Ψ_w . No presente estudo, nem todos os clones com menores Ψ_w se mostraram como mais sensíveis. De acordo com Chemlali et al., 2022, as estratégias e respostas do eucalipto sob estresse hídrico variam muito entre as espécies, genótipos, híbridos e clones. De maneira geral, os diferentes genótipos utilizam diferentes estratégias para combater os efeitos negativos da seca (Pita-Barbosa et. al., 2023). Portanto, tomados em conjunto, estes resultados reforçam a necessidade de avaliar e combinar outros ajustes morfológicos e/ou fisiológicos para serem caracterizados como potenciais bioindicadores de tolerância à seca.

5. CONCLUSÕES

De acordo com a caracterização climática do local do plantio, realizada em três períodos consecutivos, o déficit hídrico é bem marcante no período entre abril a setembro, o que pode ter propiciado os ajustes pelas plantas para tolerar a seca e continuar sintetizando biomassa. Materiais genéticos incluindo GG2673, VM1, GG1980, GG3389XGG4302, GG918XVS62, AEC2034XLR831, I3000XVM1 e VM4XCAM apresentaram os maiores IMAvol na terceira coleta e foram caracterizados como genótipos com potencial tolerância à seca. Embora VM4XCAM não apresente maiores valores de AFE nos períodos de coleta,

maiores AF foram observadas nos três anos devido a menor redução no comprimento e largura foliar, já a progênie I3000XVM1 apresentou os menores valores em todos os parâmetros aqui analisados, o que sugere que a tolerância à seca observada neste material em função da AF e AFE é uma característica inerente de seu genótipo que sofre pouca ou nenhuma influência do ambiente.

A maioria dos materiais genéticos com potencial tolerância à seca foram caracterizados pela manutenção de maiores Ψ_w , o que aumenta a eficiência do uso da água pela planta inteira além de reduzir a transpiração. Tendo em vista esses ajustes na morfologia e fisiologia de distintos genótipos de eucalipto, as variáveis AFE, AF e Ψ_w apresentam-se como potenciais bioindicadores de tolerância à seca, podendo auxiliar grandemente na seleção precoce de clones em programas de melhoramento genético com vistas à tolerância à seca.

6. REFERÊNCIAS

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper 56). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

Amrutha, S., Muneera Parveen, A. B., Muthupandi, M., Sivakumar, V., Nautiyal, R. i Dasgupta, M.G. (2019). Variation in morpho-physiological, biochemical and molecular responses of two *Eucalyptus* species under short-term water stress. *Acta Botanica Croatica*, 78 (2), 125-134. <https://doi.org/10.2478/botcro-2019-0021>

Bangar, P., Chaudhury, A., Tiwari, B., Kumar, S., Kumari, R., Bhat, K. V. Morphophysiological and biochemical response of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] varieties at different developmental stages under drought stress. *Turk. J. Biol.* 2019, 43, 58–69.

Benomar L, Lamhamedi MS, Villeneuve I, Rainville A, Beaulieu J, Bousquet J, Margolis HA (2015) Fine-scale geographic variation in photosynthetic-related traits of *Picea glauca* seedlings indicates local adaptation to climate. *Tree Physiol* 35:864–878.

Blackman, C. J., Aspinwall, M. J., Tissue, D. T., Rymer, P. D. Genetic adaptation and phenotypic plasticity contribute to greater leaf hydraulic tolerance in response to drought in warmer climates. *Tree Physiology*, Volume 37, Issue 5, May 2017, Pages 583–592

Campoe, O. C., Munhoz, J. S., Alvares, C. A., Carneiro, R. L., DE Mattos, E. M., Ferez, A. P. C., Stape, J. L. (2016) Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. *Forest Ecol Manag* 380:149–160

Chain, J. M., Tubert, E., Graciano, C. et al. Growth promotion and protection from drought in *Eucalyptus grandis* seedlings inoculated with beneficial bacteria embedded in a superabsorbent polymer. *Sci Rep* 10, 18221 (2020).

Chaves, M.M.; Costa, J.M.; Saibo, N.J.M. Recent advances in photosynthesis under drought and salinity. *Adv. Bot. Res.* 2011, 57, 49–104

Chemlali, I., Yahia, K.B., Belaïd, S., Rabeh, S.B., Romdhane, C.B., Messoudi, N., & Saadaoui, E. (2022). Anatomical, physiological, biochemical and molecular responses of *Eucalyptus* spp. under water deficit conditions and

characteristics of Tunisian arid species: an overview. *Notulae Scientia Biologicae*

Chen X, Zhao P, Ouyang L, Zhu L, Ni G, Schafer KV (2020) Wholeplant water hydraulic integrity to predict drought-induced *Eucalyptus urophylla* mortality under drought stress. *For Ecol Manag* 468:118179. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118179>

Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558, 531–539

Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T. J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R., et al. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491, 752–755

Clarice Noleto Dias, N. C., Picoli, T. A. E., Andrea Porzel, A., Wessjohann, A. L., Tavares, F. J., A. Farag, A. M. Metabolomics characterizes early metabolic changes and markers of tolerant *Eucalyptus* ssp. clones against drought stress, *Phytochemistry*, Volume 212, 2023.

Climatedata.org. Dados climáticos históricos e previsões climáticas. Disponível em: <<https://www.climatedata.org>>. [Acesso em 05/08/2024].

Conti Junior, C. F. L. J., Araujo, J. M., De Paula, C. R., Queiroz, B. T., Hakamada, E. R., R. M. Hubbard, M. R. Quantifying turgor loss point and leaf water potential across contrasting *Eucalyptus* clones and sites within the TECHS research platform, *Forest Ecology and Management*, Volume 475, 2020

Correia, B., Hancock, R. D., Amaral, J., Cadenas, A. G., Valledor, L., Pinto, G. (2018) Combined drought and heat activates protective responses in *Eucalyptus globulus* that are not activated when subjected to drought or heat stress alone. *Front Plant Sci* 9:819. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00819>

Da Cunha, G. Q. T., Santos, C. A., Novaes, E., Hansted, S. L. A.; Yamaji, M. F., Sette Jr, R. C. *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers, *Biomass and Bioenergy*, Volume 144, 2021

Deka, D.; Singh, A. K.; Singh, A. K. Effect of Drought Stress on Crop Plants with Special Reference to Drought Avoidance and Tolerance Mechanisms: A Review. *Int. drought in warmer climates. Tree Physiology*, Volume 37, Issue 5, May 2017, Pages 583–592

J. Curr. Microbiol. App. Sci. 2018, 7, 2703–2721. *Eucalypt* plantation management in regions with water stress *Southern For. J. For. Sci.*, 79 (3) (2017), pp. 169-183

Elissetche, J. P. et al. Wood basic density assessment of *Eucalyptus* genotypes growing under contrasting water availability conditions *Forests* (2024)

Elli, F. E., Sentelhas, P. C., Fabiani, D. B. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil, *Forest Ecology and Management*, Volume 474, 2020

Favreau B, Denis M, Ployet R, Mounet F, Peireira SH, Franceschini L, Laclau J-P, Labate C, Carrer H (2019) Distinct leaf transcriptomic response of water deficient *Eucalyptus grandis* submitted to potassium and sodium fertilization. *PLoS ONE* 14:1–30. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218528>

Fernandes, E.T., Cairo, P. A. R., Morais, J. L. C. (2013) Crescimento de clones de eucalipto sob deficiência hídrica. *Enciclopédia biosfera* 9(17):870

Ferreira, V. M., de Andrade, J. R., dos Santos, C. M. *et al.* Physiological plasticity in eucalyptus clones in the vegetative stage contributes to drought tolerance. *J. For. Res.* **34**, 1549–1561 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01571-5>

Fletcher, L. R., Cui, H., Callahan, H., Scoffoni, C., John, G. P., Bartlett, M. K., Burge, D. O. (2018) Evolution of leaf structure and drought tolerance in species of Californian *Ceanothus*. *American Journal of Botany* 105(10): 1672–1687.

Freitas, F. B. Martins, M. C. Abreu. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings *Pesq. Agropec. Bras.*, 52 (2017), pp. 283-292, 10.1590/S0100-204X2017000500001

Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach, *Ecological Indicators*, Volume 114, 2020, 106325, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106325>.

Gonçalves, J. L. M., Alvares, C. A., Rocha, J.H.T., Brandani, C.B., Hakamada R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, South Africa, v. 79, n. 3; p. 169-183, 2017.

González-Orozco, C., Pollock, L., Thornhill, A. *et al.* Phylogenetic approaches reveal biodiversity threats under climate change. *Nature Clim Change* **6**, 1110–1114 (2016)

Greenwood, S., Ruiz-Benito, P., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Kitzberger, T., Allen, C. D., *et al.* (2017). Tree mortality across biomes is promoted by drought intensity, lower wood density and higher specific leaf area. *Ecol. Lett.* **20**, 539–553. doi: 10.1111/ele.12748

Gustavsson, L. *et al.* Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 612–624, 2017.

Hacke, U. G., Sperry, J. S., Pockman, W. T., Davis, S. D., and McCulloh, K. A. (2001). Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. *Oecologia* 126, 457–461. doi: 10.1007/s004420100628

Hajek P, Kurjak D, von Wühlisch G, Delzon S, Schuldt B (2016) Intraspecific variation in wood anatomical, hydraulic and foliar traits in ten European beech provenances differing in growth yield. *Front Plant Sci* 7:791.

Hakamada, E. R., Binkley, D. R., Cegatta, I., Alvares, C., Campoe, O; Stape, L. J., Stocking response of *Eucalyptus* growth depends on site water deficit across a 2100-km gradient in Brazil, *Forest Ecology and Management*, Volume 546, 2023

Hakamada, R., Hubbard, R. M., Ferraz, S., Stape, J. L., & Lemos, C. (2017). Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal *Eucalyptus* genotypes^s. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 79(3), 251–257. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1256041>

Harfouche, A., Meilan, R., Altman, A. Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement, *Tree Physiology*, Volume 34, Issue 11, November 2014, Pages 1181–1198.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Sumário Executivo - 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>

INMET INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. In, Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa DF, Brasília (2023)

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdjie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

Johnson, D. M, Berry, Z. C., Baker, K. V., Smith, D. D., McCulloh, K. A., Domec, J. C. (2018) Leaf hydraulic parameters are more plastic in species that experience a wider range of leaf water potentials. *Funct Ecol* 32:894–903.

Kapoor D, Bhardwaj S, Landi M, Sharma A, Ramakrishnan M, Sharma A (2020) The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Appl Sci* 10(16):5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>

Knutzen F., Meier I. C, Leuschner, C. (2015) Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus*

sylvatica L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree Physiol* 35:949–963.

Köppen, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Eds.). *Handbuch der Klimatologie*. v. 1, part C. Gebrüder Borntraeger, 1936.

Lamy, J. B., Delzon, S., Bouche, P. S., Alia, R., Vendramin, G. G., Cochard, H., Plomion, C. Limited genetic variability and phenotypic plasticity detected for cavitation resistance in a Mediterranean pine. *New Phytologist*, v. 201, v. 3, p. 874–886, 2014.

Laura, A. V., Neto, G. M. M., Almeida, G. R., Alves, V. F. O eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Cerrado. Brasília, DF:Embrapa, 2021

Li X, Blackman CJ, Choat B, Duursma RA, Rymer PD, Medlyn BE, Tissue DT (2018) Tree hydraulic traits are coordinated and strongly linked to climate-of-origin across a rainfall gradient. *Plant Cell Environ* 41:646–660.

Martins, G. S., Freitas, N. C., Máximo, W. P. F., Paiva, L. V. Gene expression in two contrasting hybrid clones of *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla* grown under water deficit conditions, *Journal of Plant Physiology*, Volume 229, 2018, Pages 122-131, ISSN 0176-1617

Maseda, P. H., Fernández, R. J., 2016: Growth potential limits drought morphological plasticity in seedlings from six *Eucalyptus* provenances. *Tree Physiology* 36, 243–251.

Matesanz, S., Gianoli, E., and Valladares, F. (2010). Global change and the evolution of phenotypic plasticity in plants. *Ann. New York Acad. Sci.* 1206, 35–55. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05704.x

Melo, B. A. et al. Productivity and wood quality traits of *Corymbia* and *Eucalyptus* species in two soil water deficit sites, *Industrial Crops and Products*, Volume 219, 2024.

Müller, C., Hodecker, B. E. R, de Barros, N. F., Merchant, A. (2020) A physiological approach for pre-selection of *Eucalyptus* clones resistant to drought. *iForest* 13(1):16–23. <https://doi.org/10.3832/ifor3185-012>

Noletto Dias, C., Picoli, T. A. E., Andrea Porzel, A., Wessjohann, A. L., Tavares, F. J., A. Farag, A. M. Metabolomics characterizes early metabolic changes and markers of tolerant *Eucalyptus* ssp. clones against drought stress, *Phytochemistry*, Volume 212, 2023.

Oberschelp, G. P. J., Morales, L. L., Montecchiarini, M. L., Harrand, L., Podesta, F. E., Margarit, E., 2022. Harder, better, faster, stronger: frost

tolerance of *Eucalyptus benthamii* under cold acclimation. *Plant Physiol. Biochem.* 186, 64–75.

Onoda, Y., Richards, A. E., and Westoby, M. (2010). The relationship between stem biomechanics and wood density is modified by rainfall in 32 Australian woody plant species. *New Phytol.* 185, 493–501. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03088.x

Oyanoghafo O. O, Miller, A. D., Toomey, M., Ahrens, C. W., Tissue, D. T., and Rymer, P. D. (2023). Contributions of phenotypic integration, plasticity and genetic adaptation to adaptive capacity relating to drought in *Banksia marginata* (Proteaceae). *Front. Plant Sci.* 14:1150116. doi: 10.3389/fpls.2023.1150116

Pita-Barbosa, A., Oliveira, L. A., de Barros, N. F., Hodecker, B. E. R., Oliveira, F. S., Araújo, W. L., Martins, S. C. (2023). Developing a Roadmap to Define a Potential Ideotype for Drought Tolerance in *Eucalyptus*. *For Sci* 69:101–114

Pritzkow, C.; Szota, C.; Williamson, V.G.; Arndt, S.K. Phenotypic Plasticity of Drought Tolerance Traits in a Widespread Eucalypt (*Eucalyptus obliqua*). *Forests* **2020**, *11*, 1371. <https://doi.org/10.3390/f11121371>

R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Reis, M. G. Carbon, water and energy fluxes in eucalyptus plantations and savanna in brazilian tropics. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

Rocha, G. S. M. *et al.* Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species, *Forest Ecology and Management*, Volume 473, 2020, 118290

Romeet, S., Rai, K.C., Anugrah, T., Haripriya, K., Manoj, R., Priya, K., Kavidayal, H., Raturi, M., Kainthola, C., Barthwal, S., 2019. Differential responses in gas exchange variability, water use efficiency and chlorophyll content in *Eucalyptus* clones under drought stress. *Indian* 145 (5), 459–466.

Rosner, S., Světlík, J., Andreassen, K., Børja, I., Dalsgaard, L., Evans, R., ... & Solberg, S. (2016). Novel hydraulic vulnerability proxies for a boreal conifer species reveal that opportunists may have lower survival prospects under extreme climatic events.

Rubilar, R., Hubbard, R., Emhart, V., Mardones, O., Quiroga, J. J., Medina, A., Valenzuela, H., Espinoza, J., Burgos, Y. Bozo, D. Climate and water availability impacts on early growth efficiency of *Eucalyptus* genotypes: The importance of GxE interactions, *Forest Ecology and Management*, Volume 458, 2020, 117763

Salehi-Lisar, S.Y.; Bakhshayeshan-Agdam, H. Drought stress in plants: Causes, consequences, and tolerance. In *Drought Stress Tolerance in Plants*; Springer: Cham, Switzerland, 2016.

Santos, Humberto Gonçalves dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 Brasília: EMBRAPA, 2018, 356 p.

Schuldt B, Knutzen F, Delzon S, Jansen S, Müller-Haubold H, Burlett R, Clough Y, Leuschner C (2016) How adaptable is the hydraulic system of European beech in the face of climate change-related precipitation reduction? *New Phytol* 210:443–458.

Searson, Matthew J. Dane S. Thomas, Kelvin D. Montagu, Jann P. Conroy, Wood density and anatomy of water-limited eucalypts, *Tree Physiology*, Volume 24, Issue 11, November 2004, Pages 1295–1302,

Silva, P. H., Campoe, O. C., Paula, R. C., Lee, D. J. (2016) Seedling growth and physiological responses of sixteen eucalypt taxa under controlled water regime. *Forests* 7(6):110. <https://doi.org/10.3390/f7060110>

Soares, Carlos Pedro Boechat; Neto, Francisco de Paula; Souza, Agostinho Lopes de. *Dendrometria e Inventário Florestal*. 2ª. Ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 272 p.

Stotz, G.C., SalgadoLuarte C., Escobedo V.M., Valladares F. & Gianoli E. (2022) Global trends in phenotypic plasticity of plants. *Ecology Letters*, 24, 2267–2281

Valladares, F. et al. The effects of phenotypic plasticity and local adaptation on forecasts of species range shifts under climate change. **Ecology letters**, v. 17, n. 11, p. 1351–1364, 2014.

Vivas, M., Rolo, V., Wingfield, M. J., & Slippers, B. (2019). Maternal environment regulates morphological and physiological traits in *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management*, 432, 631-636.

Xu, G.-Q.; Arndt, S. K.; Farrell, C. Leaf Traits of Drought Tolerance for 37 Shrub Species Originating from a Moisture Gradient. *Water* **2020**, 12, 1626. <https://doi.org/10.3390/w12061626>

Xu, P., Zhou, T., Yi, C., Fang, W., Hendrey, G., Zhao, X. (2018) Forest drought resistance distinguished by canopy height. *Environmental Research Letters* 13 075003.

Yang, Y., Tong, Y., Yu, G., Zhang, S., Huang, W. Photosynthetic characteristics explain the high growth rate for *Eucalyptus camaldulensis*: Implications for breeding strategy, *Industrial Crops and Products*, Volume 124, 2018, Pages 186-191

Zonta, J. H., Brandão, Z. N., Rodrigues, J. I. S., Sofiatti, V. Resposta do algodoeiro ao déficit hídrico em diferentes fases de crescimento. Rev. Caatinga, Mossoró, v. 30, n. 4, p. 980-990, 2017.