

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

**RESPOSTAS ADAPTATIVAS DE *Anemopaegma arvense* À
SAZONALIDADE HÍDRICA NO CERRADO:
IMPLICAÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO EM
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Autora: Polyana Rafaela Ramos
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva

Rio Verde, GO
Novembro - 2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

**RESPOSTAS ADAPTATIVAS DE *Anemopaegma arvense* À
SAZONALIDADE HÍDRICA NO CERRADO:
IMPLICAÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO EM
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Autora: Polyana Rafaela Ramos
Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva

Tese apresentada, como parte das exigências para a obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração em Fisiologia, Bioquímica e Pós-Colheita de produtos vegetais.

Rio Verde, GO
Novembro – 2024

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Polyana Rafaela Ramos

Matrícula:

2021102320140221

Título do trabalho:

Respostas adaptativas de Anemopaegma arvense à sazonalidade hídrica no Cerrado: Implicações para a conservação em cenários de mudanças climáticas

RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 05 / 01 / 2025

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
 POLYANA RAFAELA RAMOS
Data: 13/01/2025 09:23:48-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Rio Verde

Local

05 / 01 / 2025

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente



FABIANO GUIMARAES SILVA

Data: 06/01/2025 10:05:20-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas (SIBI) – Instituto Federal Goiano

R175r

Ramos, Polyana Rafaela.

Respostas Adaptativas de *Anemopaegma arvense* à sazonalidade hídrica no Cerrado: implicações para a conservação em cenários de mudanças climáticas [manuscrito] / Polyana Rafaela Ramos. – Rio Verde, GO: IF Goiano, 2024.

82 fls. : il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Seca. 2. Estresse abiótico. 3. Plantas do Cerrado. I. Silva, Fabiano Guimarães. II. Título. III. Instituto Federal Goiano.

CDU 630(213.54)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 78/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, BIOQUÍMICAS, ANATÔMICAS E METABÓLICAS EM PLANTAS SILVESTRES DE ANEMOPAEGMA ARVENSE EM FUNÇÃO DA SAZONALIDADE HÍDRICA

Autora: Polyana Rafaela Ramos

Orientador: Dr. Fabiano Guimarães Silva

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em, 29 de novembro de 2024.

Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva (Presidente)

Prof.^a Dr.^a Fábila Barbosa da Silva (Avaliadora interna)

Prof.^a Dr.^a Fernanda dos Santos Farnese (Avaliadora interna)

Prof. Dr. Francisco de Almeida Lobo (Avaliador externo)

Prof. Dr. Lucas Loram Lourenço (Avaliador interno)

Documento assinado eletronicamente por:

- Fabiano Guimaraes Silva, DIRETOR(A) GERAL - CD0002 - CMPRV, em 29/11/2024 10:15:14.
- Fabia Barbosa da Silva, 2020202341360019 - Discente, em 02/12/2024 10:53:29.
- Lucas Loram Lourenço, 2021202341360022 - Discente, em 02/12/2024 10:54:37.
- Fernanda dos Santos Farnese, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 02/12/2024 17:43:01.
- Francisco de Almeida Lobo, Francisco de Almeida Lobo - Professor Avaliador de Banca - Ufmt (33004540000100), em 02/12/2024 21:22:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 22/11/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 654428
Código de Autenticação: 48867c6172



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela força, sabedoria e ânimo frente aos desafios e oportunidades encontradas. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – IF Goiano, Campus Rio Verde e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – IFMT pelo convênio e parceria que possibilitou o desenvolvimento deste doutorado institucional. Agradeço especialmente ao IFMT – Campus Confresa, pelo apoio e flexibilidade na realização das atividades da pós-graduação sempre que necessárias.

Aos integrantes componentes da banca de avaliação deste trabalho, pelas contribuições.

Aos integrantes do Laboratório de Estudos Avançados em Agricultura Vertical do IF Goiano – Campus Rio Verde, pela ajuda nos trabalhos e análises laboratoriais e pela recepção e acolhimento.

Ao Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva, pela orientação, disponibilidade e auxílio para que a pesquisa pudesse ser realizada mesmo a 1.000 km de distância de Rio Verde e com os desafios de atravessar a estrada de chão da região do Vale do Araguaia. Agradeço pela oportunidade de trocar experiências e pelo apoio todas as vezes que foram necessárias minha vinda para Rio Verde.

Às minhas coorientadoras Dr.^a Fábيا Barbosa da Silva e Prof.^a Dr.^a Fernanda dos Santos Farnese, pela condução no processo de construção do conhecimento em uma área nova para mim e que trouxe muitos desafios, mas também abriu muitos horizontes. Vocês são um exemplo de profissional!

Ao Prof. Dr. Arno Rieder (*in memoriam*), que me apresentou a iniciação científica e conduziu para o universo da Pesquisa e Extensão.

À minha família, minha mãe Ivete, Gabriela e Abel (irmã e sobrinho/afilhado), que sempre estiveram ao meu lado, são meu suporte e alicerce nas vitórias e motivo pelo qual a cada dia tento buscar e ser melhor.

Ao meu esposo José Pereira Cordão Sobrinho, pelo apoio em todos os momentos, auxílio nas preparações para os trabalhos de campo e paciência durante esses anos que exigiram muito estudo e dedicação intensa.

Obrigada a todos!

BIOGRAFIA DA AUTORA

Polyana Rafaela Ramos, natural de Campo Mourão – PR é filha de Maria Ivete Bassi e Antônio Ramos. Graduou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT – Campus Jane Vanini em 2007, ao qual foi bolsista de Iniciação Científica (PROIC-Unemat) durante toda a graduação sob orientação do Prof. Dr. Arno Rieder.

Em 2010 tornou-se servidora pública federal ao ingressar como docente no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso - IFMT – Campus Confresa. Em 2013 concluiu o Mestrado em Ciências Ambientais na Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT – Campus Jane Vanini, ao qual foi bolsista CAPES-CNPq entre 2011 e 2013, sob orientação do Prof. Dr. Elias Renato da Silva Januário.

Ingressou no doutorado em Ciências Agrárias em 2021 pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano– IF Goiano- Campus Rio Verde, sob orientação do Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	xv
LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACOES E UNIDADES	xviii
RESUMO	12
GENERAL ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
2. OBJETIVOS.....	25
2.1. Objetivo Geral.....	25
2.2. Objetivos Específicos.....	25
3. CAPÍTULO 1: Respostas fisiológicas, morfoanatômicas e bioquímicas  sazonalidade de <i>Anemopaegma arvense</i> em um fragmento de Cerrado.....	26
3.1 Introdução	26
3.2 Material e Métodos.....	29
3.2.1 <i>rea de estudo, material vegetal e desenho</i> <i>experimental</i>	29
3.2.2 <i>Análise do Potencial hídrico foliar Ψ_w</i>	30
3.2.3 <i>Análise morfoanatmica</i>	30
3.2.4 <i>Fluorescncia da clorofila a</i>	31
3.2.5 <i>Trocas gasosas</i>	31
3.2.6 <i>Atividade de enzimas antioxidante de defesa e de danos</i> <i>celulares</i>	32
3.2.7 <i>Análises Estatsticas</i>	33
3.3. Resultados	33
3.3.1 <i>Potencial Hidrico (Ψ_w)</i>	33
3.3.2 <i>Características morfoanatômicas</i>	34
3.3.3 <i>Fluorescência da clorofila a</i>	36
3.3.4 <i>Trocas gasosas</i>	38
3.3.5 <i>Danos celulares e atividade de enzimas antioxidantes em função da</i> <i>sazonalidade de <i>A. arvense</i></i>	39
3.4 Discussão.....	40
3.5 Conclusão.....	44
3.6 Referências.....	45

4. CAPÍTULO 2: Sazonalidade hídrica modifica o perfil metabólico de <i>Anemopaegma arvense</i>, uma espécie nativa do cerrado.....	555
Resumo	55
4.1 Introdução.....	55
4.2. Material e Métodos	57
4.2 .1 <i>Área de estudo, material vegetal e desenho experimental.....</i>	<i>57</i>
4.2.2 – <i>Extração dos metabólitos</i>	<i>59</i>
4.2.3 – <i>Derivatização dos metabólitos</i>	<i>60</i>
4.2.4 – <i>Análise por GC-MS e processamento dos dados</i>	<i>60</i>
4.2.5 – <i>Análise Estatística dos dados.....</i>	<i>61</i>
4.3 Resultados	61
4.3.1 <i>Perfil metabólico de <i>Anemopaegma arvense</i> em resposta às variações sazonais na precipitação.....</i>	<i>61</i>
4.4. Discussão.....	67
4.5 Conclusão.....	72
4.6 Referências.....	72
5. CONCLUSÃO GERAL	82

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS, MORFOANATÔMICAS E BIOQUÍMICAS À SAZONALIDADE DE *Anemopaegma arvense* EM UM FRAGMENTO DE CERRADO

- Figura 1:** Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) entre os meses de abril de 2021 a janeiro de 2022, em Porto Alegre do Norte-MT. Em destaque as épocas de início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e chuvosa (C) que foram realizadas as observações.....30
- Figura 2:** Potencial hídrico (MPa) da antemanhã (Ψ_{wam}) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....34
- Figura 3:** Corte transversal do mesofilo (MS) de folhas de *Anemopaegma arvense* mostrando a epiderme adaxial (AdEp), epiderme abaxial (AbEp), parênquima paliçádico (PP) e parênquima esponjoso (SP). Os cortes anatômicos foram realizados em folhas coletadas no início da seca (S_I) (a), fim da seca (S_F) (b) e estação chuvosa (C) (c).....34
- Figura 4:** Espessura da epiderme adaxial (AdEp) (a), abaxial (AbEp) (b), parênquima paliçádico (PP) (c), parênquima esponjoso (SP) (d), mesofilo (MS) (e) e espessura da folha (LT) (f) de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....35
- Figura 5:** Faces adaxial (a) e abaxial (b) de plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*).....36
- Figura 6:** Densidade (a) e comprimento dos estômatos (b) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....36

Figura 7: Rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m) (a), da probabilidade de em $t = 0$ um éxciton aprisionado mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após a Quinona A (Qa) (Ψ_o) (b), probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após a Qa (Φ_{Eo}) (c), taxa máxima de captura do Fotossistema II (TRo/RC) (d), fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (Eto/RC) (e) e índice de desempenho fotossintético (PI_{ABS}) (f) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....37

Figura 8: Fluxo específico de energia luminosa por centro de reação (ABS/RC) (a), Rendimento quântico da dissipação de energia na forma de calor (Φ_{Do}) (b) e Fluxo específico de dissipação de energia na forma de calor (Dio/RC) (c) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....38

Figura 9: Taxa fotossintética (A) (a), condutância estomática (gs) (b), Respiração noturna (Rn) (c) e Relação entre taxa fotossintética e respiração noturna (A/Rn) (d) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....39

Figura 10: Atividade do Malondialdeído (MDA) (a) e das Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) Superóxido Dismutase (SOD) (b), Catalase (CAT) (c) e Ascorbato peroxidase (APX) (d) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....40

CAPÍTULO 2: SAZONALIDADE HÍDRICA MODIFICA O PERFIL METABÓLICO DE *Anemopaegma Arvense*, UMA ESPÉCIE NATIVA DO CERRADO

Figura 1: Localização da área de estudo no município de Porto Alegre do Norte, Mato Grosso, Brasil. Os pontos em amarelo indicam a localização das plantas amostradas.....59

Figura 2: Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) entre os meses de abril de 2021 a janeiro de 2022, em Porto Alegre do Norte-MT. Em destaque os meses que foram realizadas as observações.....	60
Figura 3: Metabólitos abundantes em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma arvense</i>) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S _I), fim da seca (S _F) e estação chuvosa (C). Os valores da abundância diferencial dos metabólitos são representados pelo gradiente de coloração. As cores em vermelho escuro indicam alta concentração, vermelho claro e azul claro média concentração e azul escuro baixa concentração do metabólito para cada época estudada.....	64
Figura 4: Concentração de ácidos orgânicos: Ácido galactárico (5-A) e Ácido Glicérico (5-B) em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma arvense</i>) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S _I), fim da seca (S _F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....	65
Figura 5: Presença de aminoácidos Ácido Aspártico (6-A), Prolina (6-B), Serina 6-C) e Fenilalanina (6-D) em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma arvense</i>) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S _I), fim da seca (S _F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....	66
Figura 6: Acúmulo de ácido chiquímico (7-A) e tocoferol (7-B) em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma arvense</i>) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S _I), fim da seca (S _F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....	66
Figura 7: Concentração de etanolamina (8-A), ácido galacturônico (8-B), galactinol (8-C), gluconolactona (8-D), moranolina (8-E), ácido piroglutâmico (8-F) e N-Metil-Prolina (8-G) em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma arvense</i>) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S _I), fim da seca (S _F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....	67
Figura 8: Teor de ácido 2,3-di-hidroxi-2-metilbutanoico (9-A), ácido betulínico (9-B), ácido 4-hidroxibenzóico (9-C) e ácido Abscísico (9-D) em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma arvense</i>) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S _I), fim da seca (S _F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....	68
Figura 9: Concentração de açúcares: 3-Manobiose (10-A), celobiose (10-B), sorbitol (10-C), maltose (10-D) e sacarose (10-E), em plantas de catuaba (<i>Anemopaegma</i>	

arvense) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).....69

LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÖES E UNIDADES

Ψ_w	Potencial hídrico foliar	-
AdEp	Epiderme Adaxial	-
AbEp	Epiderme Abaxial	-
PP	Parênquima paliçádico	-
SP	Parênquima esponjoso	-
MS	Mesofilo	-
LT	Espessura foliar	-
PSII	Fotossistema II	-
F_v/F_m	Rendimento quântico potencial do fotossistema II	-
A	Taxa fotossintética	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
E	Taxa transpiratória	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
gs	Condutância estomática	$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
PI _{ABS}	Análise do índice de desempenho fotoquímico	-
ABS/RC	Fluxo específico de absorção de energia luminosa	-
Psi _o	Rendimento quântico: a probabilidade, $t=0$, de um éxciton aprisionado mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após Qa	-
Φ_{D_o}	Rendimento quântico da dissipação de energia na forma de calor	-
Φ_{E_o}	Índice da probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons	-
Dio/RC	Fluxo específico de dissipação de energia por centro de reação	-
Rn	Respiração Noturna	-
A/Rn	Relação entre a taxa fotossintética e a respiração noturna	-

TR_o/RC	Taxa máxima de captura do - Fotossistema II
ETo/RC	Fluxo de transporte de elétrons - por centro de reação

RESUMO

RAMOS, POLYANA RAFAELA, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Campus Rio Verde, novembro de 2024. **Respostas Adaptativas de *Anemopaegma arvense* à sazonalidade hídrica no Cerrado: Implicações para a conservação em cenários de mudanças climáticas.** Orientador: Dr. Fabiano Guimarães Silva.

As mudanças climáticas têm intensificado os períodos de seca, ameaçando a sobrevivência de muitas espécies em diferentes biomas, incluindo o Cerrado, onde ainda são incipientes os estudos sobre o comportamento adaptativo em campo. A *Anemopaegma arvense* é uma espécie nativa do Cerrado com bioativos de uso medicinal, cosméticos, biocidas e está entre as espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção. Dessa forma, o objetivo que se teve com este estudo foi identificar e compreender as respostas fisiológicas, bioquímicas, anatômicas e metabólicas em plantas silvestres de *A. arvense* sob diferentes condições de sazonalidade hídrica em um fragmento de Cerrado no interior de Mato Grosso. O estudo foi realizado em Porto Alegre do Norte, Mato Grosso. As avaliações fisiológicas e as coletas de material vegetal para análises morfoanatômicas, bioquímicas e metabólicas ocorreram nos períodos de início da seca (S_I), final da seca (S_F) em setembro de 2021, e período chuvoso (C) em janeiro de 2022. Para atravessar o período mais seco (S_F) *A. arvense* reduziu seu desempenho fotossintético, ativando mecanismos de dissipação de energia luminosa em forma de calor para proteger as funções fotossintéticas. Essas alterações do sistema fotossintético foram acompanhadas pelo incremento da atividade de enzimas antioxidantes superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase, pelo dano às membranas devido ao aumento da peroxidação de lipídeos nelas presentes, por alterações anatômicas devido ao espessamento da epiderme adaxial, do parênquima esponjoso e paliçádico, pelo aumento na concentração de açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos. Dessa forma, os ajustes fisiológicos, bioquímicos, anatômicos e metabólicos observados para *A. arvense* ao longo das estações são de fundamental importância para que a planta consiga atravessar o período de maior déficit hídrico. Compreender como as plantas nativas respondem a campo as variações sazonais pode contribuir para futuros planos de manejo, bem como garantir a sobrevivência em um ambiente em constante mudança.

PALAVRAS-CHAVE: Seca; estresse abiótico; plantas do Cerrado.

GENERAL ABSTRACT

RAMOS, POLYANA RAFAELA, Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano - Rio Verde Campus, November 2024. **Adaptive Responses of Arvensis *Anemopaegma* to Water Seasonality in the Cerrado: Implications for Conservation in Climate Change Scenarios.** Advisor: Dr. Fabiano Guimarães Silva.

Climate change has intensified dry periods, threatening the survival of many species in different biomes, including the Cerrado, where studies about adaptive behavior in the field are still incipient. *Anemopaegma arvensis* is a species native to the Cerrado with bioactives for medicinal, cosmetic, biocide use and is among the Brazilian flora species threatened with extinction. Therefore, this study aimed to identify and understand the physiological, biochemical, anatomical and metabolic responses in wild *Anemopaegma arvensis* plants under different water seasonality conditions in a Cerrado fragment in the interior of Mato Grosso. Physiological assessments and plant material collections for morphoanatomical, biochemical and metabolic analyses occurred during the beginning of the drought (S_I), end of the drought (S_F) in September 2021, and the rainy season (C) in January 2022. To cross the drier period (SF), *A. arvensis* reduced its photosynthetic performance, activating light energy dissipation mechanisms in the form of heat to protect photosynthetic functions. These changes in the photosynthetic system were accompanied by an increase in the activity of the antioxidant enzymes superoxide dismutase, catalase and ascorbate peroxidase, by damage to membranes due to increased peroxidation of lipids present in them, by anatomical changes due to the thickening of the adaxial epidermis, the spongy parenchyma and palisade, due to the increase in the concentration of sugars, amino acids and organic acids. Therefore, the physiological, biochemical, anatomical and metabolic adjustments observed for *A. arvensis* throughout the seasons are of fundamental importance for plant to be able to overcome the period of the greatest water deficit. Understanding how native plants respond to seasonal variations in the field can inform future management plans, as well as ensure survival in an ever-changing environment.

KEY WORDS: Dry; abiotic stress; Cerrado plants.

1. INTRODUÇÃO GERAL

É crescente a quantidade de estudos voltados para compreender as respostas das plantas as mudanças climáticas que vem intensificando ao longo dos últimos anos, com impactos tanto na biodiversidade como nas plantas de interesse agrícola (Santos *et al.* 2021; Krauss, 2023). Devido à diversidade de biomas, aos diferentes sistemas de produção e à heterogeneidade regional do Brasil, acredita-se que esses impactos possam ser intensificados, afetando regiões ao norte e centro do país, que já registram temperaturas mais elevadas (Braga e Laurini, 2024). Além disso, as mudanças nos padrões de precipitação hídrica tendem a desestabilizar equilíbrios ecológicos, ameaçando espécies e impactando diretamente as atividades agrícolas, o que por sua vez, compromete a estabilidade socioeconômica (Santos *et al.* 2021; Boonman *et al.* 2022; Braga e Laurini 2024).

O domínio Cerrado, também conhecido como Savana Tropical Brasileira, é um dos *hotspots* ambientais mais relevantes do mundo, pela alta biodiversidade e endemismo. No entanto, nos últimos anos, o Cerrado tem sido um dos ecossistemas mais afetados pelas mudanças climáticas, caracterizadas por aumento da temperatura diurna e noturna, variações na precipitação e redução na umidade do ar entre o pico da estação seca e o início da estação chuvosa (Alves *et al.* 2022). Estudos realizados entre 1960-2019, indicam elevação a cerca de 1°C por década, além de períodos de seca, principalmente nos meses de maio a setembro (Hofmann *et al.* 2021). Apesar de que mudanças no clima e na vegetação ocorram naturalmente ao longo do tempo, a intensificação recente desses fenômenos tem exposto as plantas a condições severas, prejudicando processos moleculares, celulares, morfológicos e de desenvolvimento. Embora as consequências exatas para as espécies nativas ainda não sejam totalmente compreendidas, ciclos sazonais de seca intensa, intercalados com precipitações moderadas, podem enfraquecer o bioma e comprometer a sobrevivência das espécies (Gonçalves *et al.* 2021; Chaudhry e Sidhu 2022).

A catuaba (*Anemopaegma arvense*) é uma espécie nativa do Cerrado, pertencente à família Bignoniaceae, com grande potencial econômico e diversas aplicações. Está entre as vinte espécies selecionadas como “plantas para o futuro” e consideradas prioritárias para pesquisa (Pereira e Bertoni 2016; Teixeira *et al.* 2024). Além de ser utilizada na formulação de medicamentos por grandes laboratórios, a *A. arvense* é alvo de quatro patentes japonesas que destacam seus efeitos sobre o rejuvenescimento celular,

evidenciando o valor comercial (Pereira e Bertoni 2016; Teixeira et al. 2024). Os principais estudos envolvendo a *A. arvense* retratam principalmente sobre os efeitos etno e farmacológicos (Firetti-Leggieri, 2013; Calio et al. 2022; Guimarães et al. 2022), seguidos da parte de fenologia e ecologia (Mendes e Carlini, 2006; Fonseca et al. 2022) e capacidade de rebrota pós fogo (Zirondi et al. 2020; Ferraro et al. 2021). No entanto, são incipientes os estudos sobre mecanismos e estratégias, fisiológicas e bioquímicas, de sobrevivência das espécies nas condições variáveis da sazonalidade climática. Adicionalmente, são necessários mais estudos para identificar e caracterizar as substâncias produzidas por essa planta, com potencial para geração de biomoléculas que podem ser utilizadas como biocidas. Isso pode abrir novas oportunidades de renda para agricultores locais, diversificando os produtos derivados dessa espécie e ampliando seu impacto econômico.

Assim como diversas plantas do Cerrado, a *A. arvense* encontra-se na lista das espécies ameaçadas de extinção (Firetti et al. 2017; Brasil, 2022) e apresenta características adaptativas e de resiliência ainda pouco conhecidas para ambientes sazonalmente secos. Esse contraste sazonal entre a estação seca e chuvosa, bem como alta irradiância e temperaturas são características ambientais do Cerrado, que por sua vez influenciam de diferentes formas a vegetação, impondo, especialmente na estação seca, intenso estresse hídrico sobre as plantas (Vieira et al. 2017; Conceição et al. 2024). Embora algumas espécies do Cerrado apresentem mecanismos de resposta a essas condições sazonais, essas características nem sempre são encontradas em espécies de interesse agrícola (Lambers et al. 2020). Porém despertam interesse nos programas de melhoramento genético, que buscam novas técnicas que possam aumentar a tolerância e adaptação de plantas ao déficit hídrico (Amiri et al. 2024).

A seca pode provocar nas plantas inúmeras respostas anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas para aclimatarem a condições ambientais estressantes (Hanaka et al. 2021; Ylias et al. 2021). Devido a plasticidade dos tecidos foliares e vasculares, alterações estruturais como variação na espessura foliar, alterações no tamanho e densidade de estômatos, aumento da espessura de alguns tecidos podem ocorrer em situações de seca intensa e afetar a sobrevivência de indivíduo e a distribuição de espécies (Yule et al. 2024; Yavas et al. 2024; Yao et al. 2024). Pireda et al. (2019), por exemplo, evidenciaram maior espessamento de tecidos do parênquima paliçádico e esponjoso e da epiderme em folhas de *Manilkara subsericea* e *Inga laurina*. O espessamento, incluindo as camadas de tecido fotossintético do mesofilo, resulta em

folhas mais espessas, podendo contribuir para maior eficiência no uso da água em períodos secos (Binks *et al.* 2016; Ariano *et al.* 2022). Ocorrendo principalmente para a melhoria na resistência e o fluxo de água no tecido (Hernandez e Park, 2022).

Do ponto de vista fisiológico, durante os períodos de seca, a perda de água pelo processo transpiratório é reduzida ao máximo, pelo controle da abertura estomática que pode até culminar em completo fechamento desses poros (Bhusal *et al.* 2023; Bandurska 2022). Esse controle de abertura estomática é regulado por uma rede de receptores, proteínas quinases, transportadores e canais iônicos, ativados na maioria pelo acúmulo de ácido abscísico (ABA) nas células-guarda (Anfang e Shani, 2021; Liu *et al.* 2022). Esse processo diminui a taxa de assimilação de carbono, a eficiência fotossintética (Mukarram *et al.* 2021; Hemati *et al.* 2022; Zahra *et al.* 2023), conteúdo de pigmentos cloroplastídicos e a taxa de transporte de elétrons (Gupta e Prakash 2019; Ghadirnezhad Shiade *et al.* 2022; Lin *et al.* 2023). O desequilíbrio entre a geração e utilização de poder redutor, aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Yang *et al.* 2021), ocasionando alterações no estado redox celular pelos danos em ácidos nucleicos, lipídios e proteínas de membranas. Embora o acúmulo de EROs seja prejudicial, também atuam como moléculas sinalizadoras, ativando vias de resposta ao estresse que auxiliam na adaptação da planta às condições de seca (Shah *et al.* 2017; Garcia-Caparroz *et al.* 2021).

As plantas podem neutralizar o excesso de radicais livres gerado pelo estresse oxidativo através da ativação de enzimas do sistema antioxidante de defesa e do aumento na produção de metabólitos com função osmoprotetora e antioxidante (Yang *et al.* 2021; Zandalinas *et al.* 2022). Honório *et al.* (2021), evidenciaram aumento na atividade das enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POD) em plantas de *Annona crassiflora* (uma espécie nativa do Cerrado) para proteger do excesso de ROS e manter o equilíbrio redox celular. Maior atividade dessas enzimas também foram encontradas em plantas cultivadas de quinoa e feijão-caupi mediante condições de estresse hídrico causado pela seca e/ou baixa disponibilidade hídrica (Hinojosa *et al.* 2018; Melo *et al.* 2022).

O ajuste metabólico em resposta à seca é dinâmico e multifacetado, variando conforme a intensidade e duração do estresse, assim como a sensibilidade de cada espécie (Marček *et al.* 2019). Na última década, a resposta metabólica das plantas ao estresse a seca ganhou atenção especial entre pesquisadores, muitos metabólitos foram considerados como tendo papel importante na tolerância ao estresse (Nuccio *et al.* 2015; Wei *et al.* 2020). Entre essas respostas, destacam o aumento nos teores de muitos solutos

compatíveis, como açúcares, álcoois de açúcar e aminoácidos podem fornecer a compreensão do desempenho das plantas sob condições de estresse climático (Jeelani *et al.* 2018; Fàbregas e Fernie, 2019), bem como fornecer informações valiosas para os futuros programas de melhoramento (Marček *et al.* 2019). Michaletti *et al.* (2018) encontrou aminoácidos, ácidos orgânicos e açúcares como os principais metabólitos alterados em abundância após estresse por baixa disponibilidade de água em plantas de trigo. Resultados semelhantes foram encontrados por You *et al.* (2019) para o gergelim, e em metabólitos secundários como terpenos em *Xylopiá aromática* (Campos *et al.* 2024).

Neste contexto, é fato que as mudanças climáticas, especificamente a ampliação dos eventos sazonais de seca, representam grandes desafios para a produção agrícola e a preservação da biodiversidade (Kumar *et al.* 2022). Regiões brasileiras como o Norte, Nordeste e Centro-Oeste são vulneráveis a esses efeitos, o que impacta diretamente os ecossistemas e a agricultura local (Diniz-Filho *et al.* 2020; Nazareth *et al.* 2022). No caso, de plantas nativas como *A. arvense*, um histórico de estresse hídrico pode conferir às plantas um legado que as torna mais resilientes a secas recorrentes. A compreensão das respostas fisiológicas, bioquímicas e metabólicas dessa espécie é crucial, pois permite identificar mecanismos de adaptação que contribuem para a conservação e resiliência frente às mudanças climáticas, além de apoiar estratégias de manejo sustentável e programas de melhoramento genético. Assim, os estudos com a *A. arvense*, oferecem valiosos *insights* para perpetuação e adaptação dessa espécie ao ecossistema brasileiro, ajudando a entender os impactos da sazonalidade climática e a promover a proteção de ecossistemas vulneráveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, W.F, Roig, H., Kalin, L., Prado, L.F., Valdir, F.S., Steinke, A. 2022. Analyzing trends in rainfall and their impacts in water management in a Cerrado region in Brazil. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-830788/v1>.
- Afang, M., Shani, E. 2021. Transport mechanisms of plant hormones. Curr. Opin. Plant Biol. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102055>.

- Amiri, Z., Heidari, A., Navimipour, N.J. 2024. Comprehensive survey of artificial intelligence techniques and strategies for climate change mitigation. *Energy*, volume 308. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132827>.
- Ariano, A.P.R., Pessoa, M.J.G., Ribeiro Júnior, N.G., Eisenlohr, P.V., Silva, I.V. 2022. Structural leaf attributes indicate different degrees of xeromorphism: New discoveries in co-occurring species of savanna and forest formations, *Flora*. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151972>.
- Bandurska, H. 2022. Drought Stress Responses: Coping Strategy and Resistance. *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants11070922>.
- Bhusal, N., Lee, M., Reum Han, A., Kim, H.S. 2020. Responses to Drought Stress in *Prunus Sargentii* and *Larix Kaempferi* Seedlings Using Morphological and Physiological Parameters. *For. Ecol. Mang.* <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118099>.
- Binks, O., Meir, P., Rowland, L., Costa, A.C.L., Vasconcelos, S.S. 2016. Limited acclimation in leaf anatomy to experimental drought in tropical rainforest trees *Tree Physiol.* <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw078>.
- Boonman, C.C., Huijbregts, M.A.J., Benítez-López, A., Schipper, A.M., Thuiller, W., Santini, L. 2022. *Divers. Distrib.* 28. 25-37. <https://doi.org/10.1111/ddi.13431>.
- Borges, C.V., Minatel, I.O., Gomez-Gomez, H.A., Lima, G.P.P. 2017. Medicinal Plants: Influence of Environmental Factors on the Content of Secondary Metabolites. In: Ghorbonpour, M., Varma, A. (ed). 2017. *Medicinal Plants and Environmental Challenges*. p.259-277.
- Braga, A., Laurini, M. 2024. Spatial heterogeneity in climate change effects across Brazilian biomes. *Sci Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67244-x>.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 148, de 7 de junho de 2022.
- Calio, M.F., Thode, V.A., Bacon, C.D., Silvestro, D., Antonelli, A., Lohmann, L.G. 2022. Spatio-temporal evolution of the catuaba clade in the Neotropics: Morphological shifts correlate with habitat transitions. *J Biogeogr.* <http://doi.org/10.1111/jbi.14368>.
- Campos, F., Vieira, M., Sousa, M., Jorge, L., Ferreira, G., Marques, M., Boaro, C. 2024. Defense Mechanisms of *Xylopia aromatica* (Lam.) Mart. in the Dry Season in the Brazilian Savanna. *Life.* <https://doi.org/10.3390/life14111416>.

- Chaudhry, S., Sidhu, G.P.S. 2022. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell*, 41, 1-31. <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02759-5>.
- Conceição, L.F.C., da Rocha, H.R., Navarrete, N.V., Rosolem, R., Cabral, O.M.R., de Freitas, H.C. 2024. Interannual Variability of Water and Heat Fluxes in a Woodland Savanna (Cerrado) in Southeastern Brazil: Effects of Severe Drought and Soil Moisture. *Atmosphere*, 15, 668. <https://doi.org/10.3390/atmos15060668>.
- Dínez-Filho, J.A.F., de Oliveira, A.C.F.B., Chaves, L.J. Silva e Souza, K., Dobrolski, R., Rattis, L., Terribile, L.C., Ribeiro, M.S.L., Oliveira, G., Brum, F.T., Loyola, R., Telles, M.P.C. 2020. Overcoming the worst of both worlds: integrating climate change and habitat loss into spatial conservation planning of genetic diversity in the Brazilian Cerrado. *Biodivers Conserv.* <http://doi.org/10.1007/s10531-018-1667-y>.
- Fàbregas, N., Fernie, A.R. 2019. The metabolic response to drought. *Journal of Experimental Botany*, volume 70. p.1077-1085. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery437>.
- Ferraro, A., Silva, G.S., Aguiar, C.L.A., Appezzato da Glória, B. 2021. Evaluating belowground bud banks of native species from Cerrado: Structural, chemical, and ecological approaches. *Flora*. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151852>.
- Ferreira, R.B., Parreira, M.R., Nabout, J.C. 2022. Is there concordance between Science and Technology in Natural Science? Mapping the relationship among number of papers and patents from research on Cerrado plants. *World Patent Information*, volume 69. <http://doi.org/10.1016/j.wpi.2022.102108>.
- Firetti-Leggieri, F., Lohmann, L.G., Ancantara, S., da Costa, I.R., Semir, J. 2013. Polyploidy and polyembryony in *Anemopaegma* (Bignoniaceae). *Plant Reprod.* <http://doi.org/10.1007/s00497-012-0206-3>.
- Firetti, F., Zuntini, A. R., Gaiarsa, J., Oliveira, R. S. d., Lohmann, L. G., Sluys, M. V. 2017. Complete chloroplast genome sequences contribute to plant species delimitation: a case study of the *anemopaegma* species complex. *American Journal of Botany*, 104(10), 1493-1509. <https://doi.org/10.3732/ajb.1700302>.
- Fonseca, L.H.M., Nazareno, A.G., Thode, V.A., Zuntini, A.R., Lohmann, L.G. 2022. Putting small and big pieces together: a genome assembly approach reveals the largest Lamiid plastome in a woody vine. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.13207>.

- García-Caparróz, P., De Filipis, L., Gul, A., Hasanuzzaman, M., Ozturk, M., Altai, V., Lao, M.T. 2021. Oxidative Stress and Antioxidant Metabolism under Adverse Environmental Conditions: a Review. *Bot. Ver.* 87, p.421-466. <https://doi.org/10.1007/s12229-020-09231-1>.
- Ghadirnezhad Shiade, S.R.G., Fathi, A., Ghasemkheili, F.T., Amiri, E., Pessarakli, M. 2022. Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches:review. *Journal of Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2105720>.
- Gonçalves, R.V.S., Cardoso, J.C.F., Oliveira, P.E., Oliveira, D.C. 2021. Changes in the Cerrado vegetation structure: insights from more than three decades of ecological succession. *Web Ecol*, 21, p.55-64. <https://doi.org/10.5194/we-21-55-2021>.
- Guimarães, B.O., Morais, I.L, Oliveira, A.P. 2022. Medicinal plants and their popular use in Boa Esperança Settlement, Piracanjuba, Goiás, Brazil. *Bol Latinoam y del Caribe Plantas Med y Aromat*. <https://doi.org/10.37360/blacpma.22.21.4.30>.
- Gupta, R., Sharma, R.D., Rao, Y.R., Siddiqui, Z.H., Verma, A., Ansari, M.W., Rakwale, R., Turjeta, N. 2020. Acclimation potential of noni (*Morinda citrifolia* L.) plant to temperature stress is mediated through photosynthetic electron transport rate. *Plant Signaling & Behavior* (16). <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1865687>.
- Hanaka, A., Ozimek, E., Reszczynska, E., Jaroszuk-Ściseł, J., Stolarz, M. 2021. Plant Tolerance to Drought Stress in the Presence of Supporting Bacteria and Fungi: An Efficient Strategy in Horticulture. *Horticulturae*. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100390>.
- Hemati, A., Moghiseh, E., Amirifar, A., Mofidi-Chelan, M., Asgari Lajayer, B. 2022. Physiological Effects of Drought Stress in Plants. In: Vaishnav, A., Arya, S., Choudhary, D.K. (eds) *Plant Stress Mitigators*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7759-5_6.
- Hernandez, J.O., Park, B.B. 2022. The Leaf Trichome, Venation, and Mesophyll Structural Traits Play Important Roles in the Physiological Responses of Oak Seedlings to Water-Deficit Stress. *Int. J. Mol. Sci*. <https://doi.org/10.3390/ijms23158640>.
- Hofmann, G.S., Cardoso, M.F., Alves, R.J.V., Weber, E.J., Barbosa, A.A., Toledo, P.M., Pontual, F.B, Salles, L.D.O., Hasenack, H., Cordeiro, J.L.P., Aquino, F.E., Oliveira, L.F.B.

2021. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Global Change Biology*, 27. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>.
- Honório, A.B.M., De-la-Cruz-Chacón, I., Martínez-Vázquez, M., da Silva, M.R., Campos, F.G., Martin, B.C., da Silva, G.C., Fernandes Boaro, C.S., Ferreira, G. 2021. Impact of Drought and Flooding on Alkaloid Production in *Annona crassiflora* Mart. *Horticulturae*. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100414>.
- Hinojosa, L. González, J.A., Barrios-Masias, F.H., Fuentes, F., Murphy, K.M. 2018. Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants7040106>.
- Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., Hazrat, A., Khan, A.H., Fahad, S., Khan, A., Ullah, A. 2021. Drought Tolerance Strategies in Plants: A Mechanistic Approach. *J Plant Growth Regul.* <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10174-5>.
- Jeelani, S.M., Rather G.A., Sharma A., Lattoo S.K. 2018. Potential medicinal plant resources of Kashmir Himalayas, their domestication and cultivation for commercial exploitation. *J. Appl. Res. Med. Aromat. Plants*. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.11.001>.
- Krauss, W. 2023. Slowing Down Climate Services: Climate Change as a Matter of Concern. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15086458>.
- Kumar, P., Kumar, K., Kumar, S., Singh, B., Poria, V. 2022. Bioinoculants as mitigators of multiple stresses: A ray of hope for agriculture in the darkness of climate change. *Heliyon*. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11269>.
- Lambers, H., de Britto Costa, P., Oliveira, R.S., Oliveira, F.A.O. 2020. Towards more sustainable cropping systems: lessons from native Cerrado species. *Theor. Exp. Plant Physiol.* <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00180-z>.
- Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M.R., Wu, H. 2020. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiol. Biochem.* <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006>.
- Lin, Y., Shi, S., Zhang, Y., Zhang, A., Wang, Z., Yang, Y. 2023. Copper stress-induced phytotoxicity associated with photosynthetic characteristics and lignin metabolism in wheat seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114739>.

- Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J., Wang, W. 2022. Signaling Transduction of ABA, ROS, and Ca²⁺ in Plant Stomatal Closure in Response to Drought. *Int. J. Mol. Sci.* <https://doi.org/10.3390/ijms232314824>.
- Marček T, Hamow KÁ, Végh B, Janda T, Darko E. 2019. Metabolic response to drought in six winter wheat genotypes. *PLoS One*. <http://doi.org/10.1977/journal.pone.0212411>.
- Melo, A.S., Melo, Y.L., Lacerda, C.F., Viégas, P.R.A., Ferraz, R.L.S., Ghevi, H.R. 2022. Water restriction in cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]: Metabolic changes and tolerance induction . *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*. : <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n3p190-197>.
- Mendes, F.R., Carlini, E.A. 2006. Brazilian plants as possible adaptogens: An ethnopharmacological survey of books edited in Brazil. *J Ethnopharmacol.* <https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.08.024>.
- Michaletti, A., Naghavi, M.R., Toorchi, M., Zolla, L., Rinalducci, S. 2018. Metabolomics and proteomics reveal drought-stress responses of leaf tissues from spring-wheat. *Sci Rep.* <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24012-y>.
- Mukarram, M., Choudhary, S., Kurjak, D., Petek, A., Masroor, M., Khan, A., 2021. Drought: Sensing, signalling, effects and tolerance in higher plants. *Physiologia Plantarum.* <https://doi.org/10.1111/ppl.13423>.
- Nazareth, M.S., Gurgel, A.C., da Cunha, D.A. 2022. Economic effects of projected decrease in Brazilian agricultural productivity under climate change. *GeoJournal.* <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10286-1>.
- Nuccio, M., Wu, J., Mowers, R., Zhou, H.P., Meghji, M., Primavesi, L.F., Paul, M.J., Chen, X., Gao, Y., Haque, E., Basu, S.S., Lagrimi, L.M. 2015. Lagrimini Expression of trehalose-6-phosphate phosphatase in maize ears improves yield in well-watered and drought conditions. *Nat. Biotechnol.* <https://doi.org/10.1038/nbt.3277>.
- Oguz, M.C., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., Yildiz M. 2022. Drought Stress Tolerance in Plants: Interplay of Molecular, Biochemical and Physiological Responses in Important Development Stages. *Physiologia.* <https://doi.org/10.3390/physiologia2040015>.
- Pereira, A.M.S., Bertoni, B.W. *Anemopaegma arvense* – Catuaba. *In: Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: Plantas para o Futuro – Região Centro Oeste. Brasília: MMA, 2016.*

- Pireda, S., Oliveira, D.S., Borges, N.L., Ferreira, G.A., Barroso, L.M., Simioni, P., Vitória, A.P., da Cunha, M. 2019. Acclimatization capacity of leaf traits of species co-occurring in restinga and seasonal semideciduous forest ecosystems *Environ. Exp. Bot.* <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.05.012>.
- Santos, C.V., Oliveira, A.F., Ferreira Filho, J.B.S. 2021. Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil. *Revista de Economia e Sociologia Rural.* <http://doi.org/10.1590/1806-9479.2021>.
- Shah, Z.H., Rehman, H.M., Akhtar, T., Daur, I., Nawaz, M.A., Ahmad, M.Q., Rana, I.A., Atif, R.M., Yang, S.H. Chung, G. 2017 Redox and Ionic Homeostasis Regulations against Oxidative, Salinity and Drought Stress in Wheat (A Systems Biology Approach). *Front. Genet.* <https://doi.org/10.3389/fgene.2017.00141>.
- Souza, B.A.J., Ocampos, F.M.M., Pulgrossi, C.R., Dokkedal, A.L., Colnago, L.A., Saldanha, L.L. 2023. NMR-Based Metabolomics Reveals Effects of Water Stress in the Primary and Specialized Metabolisms of *Bauhinia unguolata* L. (Fabaceae). *Metabolites.* <https://doi.org/10.3390/metabo13030381>.
- Teixeira, T.M., Boeff, D.D., De Oliveira, L.C., Ritter, M.R., Konrath, E.L. 2024. The traditional use of native Brazilian plants for male sexual dysfunction: Evidence from ethnomedicinal applications, animal models, and possible mechanisms of action. *Journal of Ethnopharmacology.* <https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116876>.
- Vieira, E.A., Silva, M.G., Moro, C.F., Laura, V.A. 2017. Physiological and biochemical changes attenuate the effects of drought on the Cerrado species *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke. *Plant Physiology and Biochemistry.* <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.022>.
- Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., Chen, S. 2021. Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulturae.* <https://doi.org/10.3390/horticulturae7030050>.
- Yao, Y., Nan, L., Wang, K., Xia, J., Ma, B., Cheng, J. 2024. Integrative leaf anatomy structure, physiology, and metabolome analyses revealed the response to drought stress in sainfoin at the seedling stage. *Phytochemical Analysis.* <https://doi.org/10.1002/pca.3351>.

- Yavas, I., Jamal, MA., Din, KU., Ali, S., Hussain, S., Farooq, M. (2024) Drought-Induced Changes in Leaf Morphology and Anatomy: Overview, Implications and perspectives. *Pol. J. Environ. Stud.* <https://doi.org/10.15244/pjoes/174476>.
- You, J., Zhang, Y., Liu, A. Li, D., Wang, X., Dossa, K., Zhou, R., Yu, J., Zhang, Y., Wang, L., Zhang, X. 2019. Transcriptomic and metabolomic profiling of drought-tolerant and susceptible sesame genotypes in response to drought stress. *BMC Plant Biol.* <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1880-1>.
- Yule, T.S., de Oliveira, R.C.A., Santos, M.G. 2024. Drought-adapted leaves are produced even when more water is available in dry tropical forest. *J Plant Res.* <https://doi.org/10.1007/s10265-023-01505-0>.
- Wei, B., Hou, K., Zhang, H., Wang, X., Wu, W. 2020. Integrating transcriptomics and metabolomics to studies key metabolism, pathways and candidate genes associated with drought-tolerance in *Carthamus tinctorius* L. Under drought stress. *Industrial Crops and Products.* <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112465>.
- Zahra, N., Hafeez, M.B., Kausar, A., Al Zeidi, M., Asekova, S., Siddiqui, K.H.M., Farooq, M. 2023. Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. *Journal of Agronomy and Crop Science.* <https://doi.org/10.1111/jac.12652>.
- Zandalinas, S.I., Balfagón, D., Gómez-Cadenas, A., Mittler, R. 2022. Plant responses to climate change: metabolic changes under combined abiotic stresses. *Experimental Botany.* <https://doi.org/10.1093/jxb/erac073>.
- Zirondi, H.L., Ooi, M.K.J., Fidelis, A. 2020. Fire- triggered flowering is the dominant post-fire strategy in a tropical savanna. *J Veg Sci* 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jvs.12995>.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar as respostas anatômicas, fisiológicas, bioquímicas e metabólicas em plantas silvestres de *Anemopaegma arvense* em função da sazonalidade hídrica nas estações seca e chuvosa.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar as modificações anatômicas foliares que ocorrem e podem contribuir para o sucesso da adaptação ou permanência da espécie no ambiente nativo;
- Identificar as alterações fisiológicas da *Anemopaegma arvense* nas estações seca e chuvosa em um fragmento de Cerrado;
- Caracterizar as respostas bioquímicas e metabólicas da *Anemopaegma arvense* mediante as condições de sazonalidade do ambiente;

3. CAPÍTULO 1

(Normas de acordo com a revista Journal of Plant Research)

Respostas fisiológicas, morfoanatômicas e bioquímicas à sazonalidade de *Anemopaegma arvense* em um fragmento de Cerrado

Resumo

Plantas nativas do domínio Cerrado comumente apresentam adaptação à sazonalidade desse ambiente. No entanto, com as mudanças climáticas intensificando eventos de seca e reduzindo a precipitação, conhecer como as plantas respondem e quais mecanismos ativam para se adaptar e ajustar seu metabolismo é de extrema importância para prever planos de manejo mais eficientes. O objetivo que se teve com este estudo foi investigar as características morfoanatômicas, fisiológicas e bioquímicas da *Anemopaegma arvense* durante o início (SI) e o final da estação seca (SF) e durante a estação chuvosa (C) em um em um fragmento de Cerrado no interior de Mato Grosso. Com o avanço do período seco, a planta ajustou a estrutura anatômica para regular a perda de água por meio do aumento da espessura da epiderme adaxial (AdEp), parênquima esponjoso e paliçádico (SP e PP), mesófilo (MS) e espessura foliar (LT). Durante o período de seca mais intensa (S_F) a atividade e o desempenho fotossintético foram menores (A e PI_{ABS}). Para proteger o aparato fotossintético, a *A. arvense* aumentou ABS/RC , Dio/RC e Φ_{Do} , que atuam na dissipação do excesso de energia luminosa na forma de calor. Em resposta ao aumento de malondialdeído, houve maior atividade das enzimas antioxidantes, superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase, no período mais seco, seguido pela sua redução com o avanço da estação chuvosa, possibilitando que a planta atravesse o maior período de déficit hídrico. Os ajustes promovidos pela *A. arvense* indicam a resiliência no ambiente, permitindo a sobrevivência perante a variação sazonal e mudanças climáticas.

Palavras-chave: Anatomia; variação sazonal; seca; mecanismos de resposta.

3.1 Introdução

O Domínio Cerrado cobre 2 milhões de quilômetros quadrados e abriga mais de 5% de todas as espécies vegetais (Machado et al. 2023). Nas últimas décadas, passou por mudanças severas e atualmente, menos de 20% da cobertura vegetal nativa permanece intacta, aproximando-se rapidamente de um ponto crítico de perda de biodiversidade com impactos sociais, ecológicos e econômicos significativos (Colli et al. 2020; Machado et al. 2024; Silva et al. 2024). O Cerrado também é um ambiente rico em espécies vegetais com características relevantes para a agricultura. Este domínio é importante reservatório de recursos genéticos e de “inovações biológicas” no enfrentamento as condições ambientais sazonais. A extinção ou a destruição de qualquer espécie vegetal no Cerrado não representa apenas uma perda ecológica significativa, mas um impacto econômico (Filardi et al. 2018; Lambers et al. 2020; Schiassi et al. 2018).

Mudanças no padrão e uso da terra, ocupações irregulares, manejo incorreto do fogo e plantações comerciais (Strassburg et al. 2017; Velazco et al. 2023) e

principalmente as mudanças climáticas vêm provocando a destruição e fragmentação de habitats no Cerrado com efeitos na distribuição, fenologia, dispersão e até extinção de espécies (Alencar et al. 2020; Costa-Coutinho et al. 2022; Hofmann et al. 2021). As mudanças climáticas estão alterando drasticamente a frequência, duração e a gravidade de eventos extremos, como secas e ondas de calor induzindo agravamento das condições de seca severa na última década (Libonati et al. 2022; Marengo et al. 2022).

A *Anemopaegma arvense* (Vell.) Steffed ex de Souza conhecida como catuaba ou vergateso, pertence à família Bignoniaceae, nativa dos campos do Brasil Central. Essa planta, ameaçada de extinção por causa do valor econômico, é utilizada na medicina popular, em cosméticos pela indústria japonesa e na agricultura, com estudos sobre o potencial biocida (Ferreira et al. 2022; Firetti et al. 2017; Teixeira et al. 2024). Assim como outras espécies nativas do Cerrado, *A. arvense* adapta-se bem as variações sazonais, incluindo a estação seca e chuvosa e as altas temperaturas da região. No entanto com a intensificação das mudanças climáticas e aumento da seca, acredita-se que as plantas sejam afetadas no crescimento e produtividade com estimativas de perdas em até 30% até 2025, afetando também a interação trófica, distribuição e função de diferentes espécies nos ecossistemas (Bashir et al. 2021; Lambers et al. 2020; Ilyas et al. 2021). Apesar dos avanços científicos, ainda há muitos questionamentos e poucos estudos sobre a resiliência e adaptação das espécies do Cerrado (Chaudhry e Sidhu 2022; Hura et al. 2022; Kuhn et al. 2021).

O estresse por seca altera diversas atividades da planta, mas um dos principais efeitos é o declínio da atividade fotossintética (Kapoor et al. 2020). Durante períodos secos, os estômatos tendem a permanecer fechados como mecanismo para reduzir a transpiração e as trocas gasosas, abrindo na estação chuvosa (Wolf et al. 2016; Wright et al. 2023). Esse fechamento estomático, embora eficiente na conservação de água, impacta negativamente a fixação de carbono e o acúmulo de biomassa (Barros et al. 2020). A fotossíntese, vital no fornecimento biomassa e energia para as plantas, é um dos processos fisiológicos mais afetados pela seca (Chen et al. 2023; Ghardirnezhad Shiade et al. 2022). A redução na fixação de carbono causa o desequilíbrio redox, resultando na produção das espécies reativas de oxigênio (EROs), consequentemente danos oxidativos na maquinaria fotossintética (Sato et al. 2024; Zahra et al. 2023). Esses fatores alteram a integridade da membrana celular, levando a distúrbios metabólicos agudos, alterando a produtividade da planta e em casos mais extremos, levando à morte (Deepak et al. 2019; Kapoor et al. 2020).

As folhas são o principal órgão de transpiração e atuam como indicador da condição de deficiência hídrica, e por serem suscetíveis a mudanças ambientais, a anatomia varia de acordo com a disponibilidade de água (Yavas et al. 2022; Wang et al. 2022). Em resposta a seca, as plantas podem modificar a estrutura ajustando a condutância estomática, aumento ou redução da espessura foliar e tecidos paliçádico e esponjoso (Peña-Rojas et al. 2024). Essas alterações geralmente estão envolvidas na proteção das plantas contra a perda de água para o ambiente, aumentando a capacidade das plantas de armazenar e minimizar essa perda (Silva et al. 2018; Zúniga-Feest et al. 2017; Yavas et al. 2024).

Em condições de estresse, as plantas ativam mecanismos específicos e individuais para enfrentar os desafios ambientais. Durante a seca, ocorrem alterações bioquímicas (como no sistema antioxidante de defesa e no metabolismo), fisiológicas (como a atividade dos estômatos e a regulação fotossintética) e morfológicas (mudanças na estrutura e formato das folhas e raízes), além dos processos celulares e moleculares (Ilyas et al. 2021; Oguz et al. 2022; Yang et al. 2021). Um dos fatores importantes é a relação entre a densidade e o tamanho dos estômatos, que pode influenciar a rápida alteração da condutância estomática (Bertolino et al. 2019; Buckley 2019), e consequentemente, a taxa fotossintética (Andrade et al. 2022; Yin et al. 2020), em resposta às variações sazonais entre as estações do ano.

Com as mudanças climáticas intensificando os episódios de seca, torna-se necessário estudar plantas nativas do Cerrado, como a *A. arvense*, para entender as respostas e adaptações as mudanças sazonais do clima. Essa espécie é conhecida pela capacidade de sobreviver em ambientes sazonais marcantes. O estudo das características fisiológicas, como a capacidade de manutenção da fotossíntese, pode oferecer *insights* valiosos sobre como essa espécie lida com o déficit hídrico. Tais respostas, serão importantes para prever e gerenciar as consequências das mudanças climáticas, além de desenvolver estratégias de conservação (Grossman 2022; Sato et al. 2024). Dessa forma, aproveitando a natureza sazonal do ambiente, foi investigado como a espécie *A. arvense* regula o comportamento fisiológico, bioquímico e morfoanatômico de acordo com as mudanças sazonais induzidas pela estação seca e chuvosa em um fragmento de Cerrado no interior de Mato Grosso. Foram testadas as seguintes hipóteses: (1) a perda de água é limitada na estação seca pelo maior ajuste no fechamento estomático; (2) em condições de seca a espécie tende a promover ajustes anatômicos na espessura da epiderme e tecidos parenquimáticos e mesofílicos para melhorar a eficiência do uso da água; (3)

para evitar o estresse oxidativo a *A. arvense* possui um eficiente sistema de defesa antioxidante por meio da ativação de enzimas como a SOD, CAT e APX.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo, material vegetal e desenho experimental

As plantas de *Anemopaegma arvense* avaliadas neste estudo, estão localizadas em um fragmento de Cerrado localizado em área rural do município de Porto Alegre do Norte, situado no nordeste de Mato Grosso, na região conhecida como médio norte Araguaia. A área está localizada a cerca de 6 km do município (10° 53' 188" S e 51° 37' 273" WO), com altitude de aproximadamente 206 m. O clima da região é caracterizado por duas estações bem definidas, o inverno (estação chuvosa) e o verão (estação seca). A estação chuvosa inicia-se entre os meses de setembro e outubro e estende-se até março e abril, destacando os meses de novembro, dezembro e janeiro como os que, geralmente, apresentam a maior média mensal de precipitação (Silva et al. 2008; Zimbres et al. 2020). A precipitação anual atinge cerca de 1900 mm e a temperatura média é de 28°C, com máxima de 41°C e a mínima de 15°C (Silva et al. 2022). A estação seca é marcada por profunda deficiência hídrica, causada pela redução drástica da ocorrência de chuvas e inicia-se entre os meses de abril e maio e estende-se até parte dos meses de setembro a outubro, registrando, dessa maneira, de 5 a 6 meses de deficiência hídrica climática (Silva et al. 2008).

As avaliações e coletas de material vegetal, foram realizadas em maio de 2021, agosto de 2021 e janeiro de 2022. Com base na precipitação durante os meses anteriores às datas de amostragem evidenciados pelos dados climatológicos coletados da estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso-Campus Confresa (a aproximadamente 20 km do local da coleta das amostras em linha reta), foram definidos três condições pluviométricas: durante o período de abril até agosto de 2021 (Período Seco) e setembro de 2021 até março de 2022 (Período Chuvoso). Considerou-se que as plantas amostradas no mês de maio de 2021 foram avaliadas no início do período de seca (S_I), em agosto de 2021 no fim da seca (S_F) e em janeiro de 2022 no período chuvoso (C). Durante os períodos de avaliação padronizou-se o uso do terceiro par de folhas do ápice para a base, tentando ao máximo garantir a padronização do estágio fenológico das mesmas durante as avaliações.

A precipitação média mensal foi de 5,00 mm, 0,00 mm e 264,2 mm para maio, agosto e janeiro, respectivamente (Figura 1). Janeiro foi escolhido como mês para realização das coletas durante a estação chuvosa em função do alto índice de precipitação ocorrido no mês anterior (dezembro, 479,4 mm). Entre S_I e S_F transcorreram 106 dias e, entre S_F e C, 139 dias. Foram amostradas 15 plantas *A. arvense* em cada época.

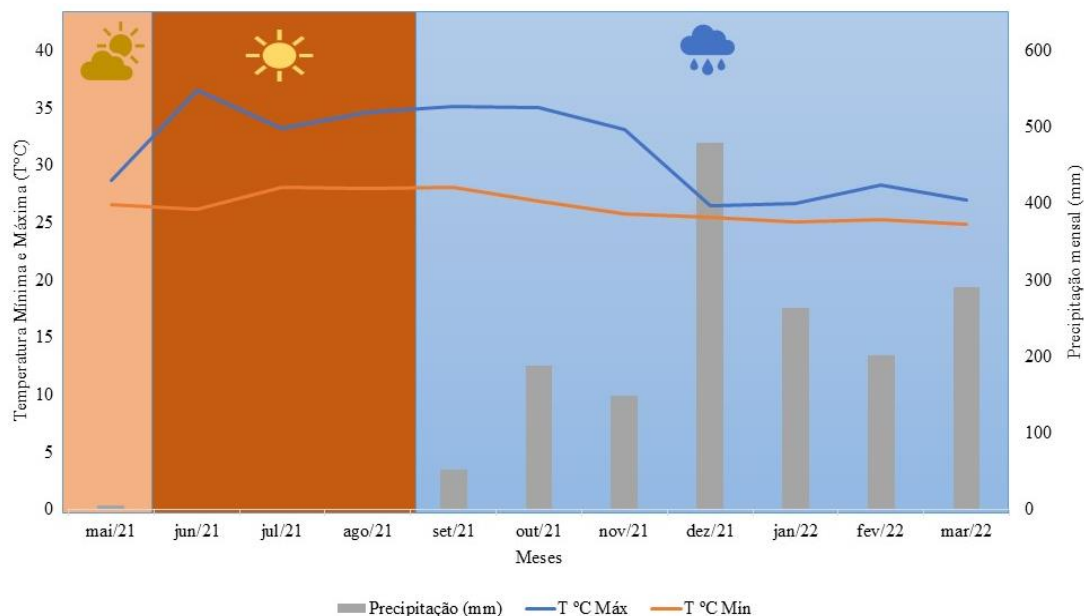


Figura 01: Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) entre os meses de abril de 2021 a janeiro de 2022, em Porto Alegre do Norte-MT. Em destaque as épocas de início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e chuvosa (C) que foram realizadas as observações. Fonte: Estação meteorológica do IFMT, Campus Confresa-MT. (2022)

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com três épocas e 15 repetições (15 espécimes) de plantas de *A. arvense*. As plantas foram selecionadas com base na presença de mais de três ramos. As avaliações de fluorescência da clorofila *a*, trocas gasosas e a coleta do material vegetal para análises anatômicas e da atividade de enzimas do sistema antioxidante de defesa, foram realizadas no terceiro par de folhas do ápice para a base de cada planta.

3.2.2 Análise do Potencial hídrico foliar Ψ_w

O potencial hídrico foi determinado pelo método de equilíbrio de pressão com auxílio de uma câmara de pressão Scholander no período da antemã entre 03h e 04h30 (Ψ_{am}) utilizando um ramo apical.

3.2.3 *Análise morfoanatômica*

Três folhas do terço médio de cada planta amostrada foram coletadas e fixadas em solução de FAA a 70% (Formaldeído: etanol: ácido acético – 4%: 50% :5%) por 48 horas, posteriormente desidratadas em série ascendente de etanol 70-100% (Johansen 1940), pré-infiltrado e infiltrado com historesina (Leica Microsystem, Mensheim, Alemanha). As amostras foram seccionadas com 5 μ m de espessura usando o micrótomo rotativo (Modelo 1508R, Logen Scientific, China), e as secções coradas com azul de toluidina em solução tampão de fosfato (0,05%) (O'Brien et al 1964). Além disso, para a análise da densidade e tamanho de estômatos, foi realizada a impressão da epiderme adaxial e abaxial em lâminas utilizando cola adesiva instantânea. As imagens foram obtidas em um microscópio Olympus (BX61, Tóquio, Japão) acoplado a uma câmera DP-72 utilizando a opção de campo claro. Nas imagens das amostras infiltradas, foram realizadas observações morfoanatômicas da epiderme adaxial (AdEp) e abaxial (AbEp), parênquima paliçádico (PP), parênquima esponjoso (SP), mesofilo (MS) e espessura foliar (LT). As medições micromorfométricas foram realizadas no software ImageJ (v. 1.47, Java Image Processing and Analysis, Houghton, MI, EUA).

3.2.4 *Fluorescência da clorofila a*

Para avaliação da fluorescência da clorofila *a* foi utilizado fluorômetro portátil FluorPen FP 100 (Photon Systems Instruments; Drasov, Czech Republic). As folhas foram adaptadas previamente ao escuro por 30 minutos para completa oxidação do sistema fotossintético de transporte de elétrons. Foram obtidos os parâmetros de índices bioenergéticos do PSII como, o rendimento quântico potencial do PSII (F_v/F_m), Ψ_o (Rendimento quântico: probabilidade em $t = 0$ de um éxciton aprisionado mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após Quinona a (Qa)); Φ_{Eo} (Índice da probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após Qa); Tro/RC (Taxa mínima de captura do fotossistema II); Eto/RC (Fluxo de transporte de elétrons (além de Qa) por centro de reação com $t = 0$); PI_{ABS} (índice de desempenho fotossintético); ABS/RC (Fluxo específico de energia luminosa por centro de reação); Φ_{Do} (Rendimento quântico da dissipação de energia na forma de calor) e Dio/RC (Fluxo específico de dissipação de energia por centro de reação) (Strasser et al. 2004).

3.2.5 *Trocas gasosas*

As trocas gasosas das plantas foram avaliadas para estimar as variáveis de taxa fotossintética (A $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), respiração noturna (R_n) e a relação entre taxa fotossintética e respiração noturna (A/R_n). Estas avaliações foram realizadas utilizando um medidor portátil de gases ao infravermelho (LI-6800 XT, Licor®, Lincoln, Nebraska, EUA), entre 8h e 11h, utilizando radiação fotossinteticamente ativa (PAR) ($1200\ \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), concentração atmosférica de CO_2 (C_a) ($\sim 400\ \mu\text{mol mol}^{-1}$), temperatura ($\sim 25\ ^\circ\text{C}$) e umidade ($\sim 50\ \%$) na câmara de medição.

3.2.6 Atividade de enzimas antioxidante de defesa e de danos celulares

A atividade das enzimas antioxidante de defesa, superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) foi medida usando aproximadamente 0,3 g de tecido foliar moído macerado em nitrogênio líquido e homogeneizado em solução tampão de fosfato de potássio (pH 6,8), e o extrato enzimático centrifugado a 12.000 g por 15 minutos a $4\ ^\circ\text{C}$. O sobrenadante foi utilizado como extrato bruto (Debona et al. 2012). A atividade da SOD (SOD - EC 1.15.1.1) foi determinada medindo a capacidade da enzima de reduzir fotoquimicamente o azul de nitrotetrazólio (NBT), segundo Del Longo et al. (1993) e determinado em 560 nm em espectrofotômetro (Evolução 60S, Thermo Fisher Scientific Inc., MA, EUA). Uma unidade SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir 50% da fotorredução do NBT (Beauchamp e Fridovich 1971). A atividade de CAT foi determinada pela taxa de degradação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 240 nm durante dois minutos a $25\ ^\circ\text{C}$ (Havir e McHale 1987). O coeficiente de extinção molar de $36\ \text{M}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Anderson et al. 1995) foi utilizado para calcular a atividade enzimática. A APX foi determinada de acordo com Nakano e Asada (1981) e foi medida pela taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm durante um minuto a $25\ ^\circ\text{C}$. O coeficiente de extinção molar de $2,8\ \text{mM}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Nakano e Asada 1981) foi utilizado para calcular a atividade. Todas as atividades enzimáticas foram expressas com base na proteína, cuja concentração foi determinada pelo método proposto por Bradford (1976).

O dano celular pelo estresse oxidativo foi avaliado pela peroxidação de lipídios via acumulação de malondialdeído (MDA), conforme descrito por Cakmak e Horst (1991). Foi adicionado 1 mL do meio de reação, consistindo em 0,5% (p/v) ácido tiobarbitúrico (TBA) e ácido tricloroacético (TCA) 10% (p/v), para tubos de ensaio contendo 0,3 mL do sobrenadante, que foram então incubados a $90\ ^\circ\text{C}$ por 20 minutos. As reações foram interrompidas em banho de gelo e as amostras centrifugadas a 10.000

g por cinco minutos para eliminação de bolhas. As amostras foram lidas em espectrofotômetro UV-VIS (Evolution 60S, Thermo Fisher Scientific Inc., MA, EUA) em 440, 532 e 600 nm, e o conteúdo MDA foi expresso como $\mu\text{mol MDA g}^{-1}$ de MF.

3.2.7 Análises Estatísticas

Os resultados foram submetidos aos tratamentos estatísticos pertinentes utilizando o programa computacional R (R Core Team 2022). Primeiramente as variáveis foram submetidas a análise exploratória e de resíduo, que foram identificados e retirados os outliers por meio da função *outlierTest* do pacote Car (Fox e Weisberg 2019). Posteriormente foi avaliado a normalidade dos resíduos através do teste de Shapiro Wilk utilizando a função *Shapiro.test*.

A análise de variância foi realizada através da função *aov*, considerando o fator “época” como efeito de tratamento perante o comportamento das variáveis relacionadas a bioquímica, fisiologia da *A. arvense*. As médias estimadas pela função *emmeans* do pacote Emmeans (Lenth R 2022), e quando o efeito dos tratamentos foi significativo, submetido ao teste de comparação de médias Tukey. Também foi realizada análise multivariada utilizando PCA (Análise dos Componentes Principais) utilizando os pacotes FactoMineR (Le; Josse e Husson 2008) e factoextra (Kassambara e Mundt, 2020).

3.3 Resultados

3.3.1 Potencial Hídrico (Ψ_w)

A sazonalidade do ambiente influenciou no potencial hídrico (Ψ_{wam}) de *Anemopaegma arvense*. Foi observado redução no Ψ_{wam} no período de estação de seca (S_I e S_F). Na estação chuvosa, o Ψ_{wam} das plantas foi restabelecido (Fig. 2).

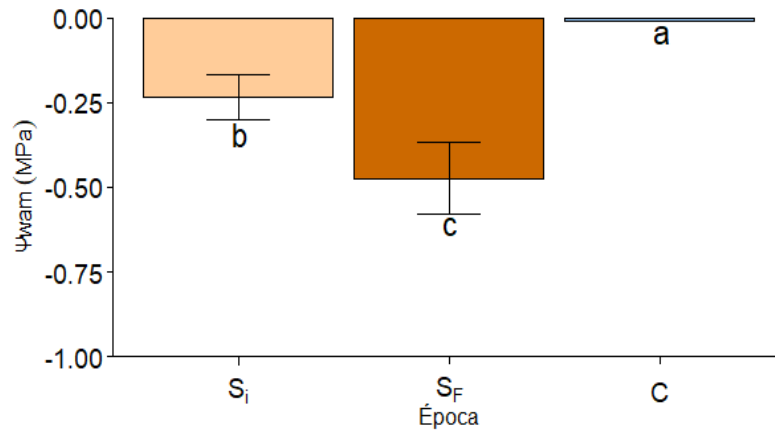


Fig 2: Potencial hídrico (MPa) da antemanhã (Ψ_{wam}) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_i), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

3.3.2 Características morfoanatômicas

O tecido foliar da *Anemopaegma arvense* é composto por uma epiderme unisseriada tanto na face adaxial (AdEp) quanto na abaxial (AbEp). O mesofilo (MS) dorsiventral assimétrica, com 1 a 2 camadas de parênquima paliçádico (PP) alongado na face adaxial. No parênquima esponjoso (SP), as células são de diferentes formatos, com amplos espaços intercelulares (Fig. 3 a-c).

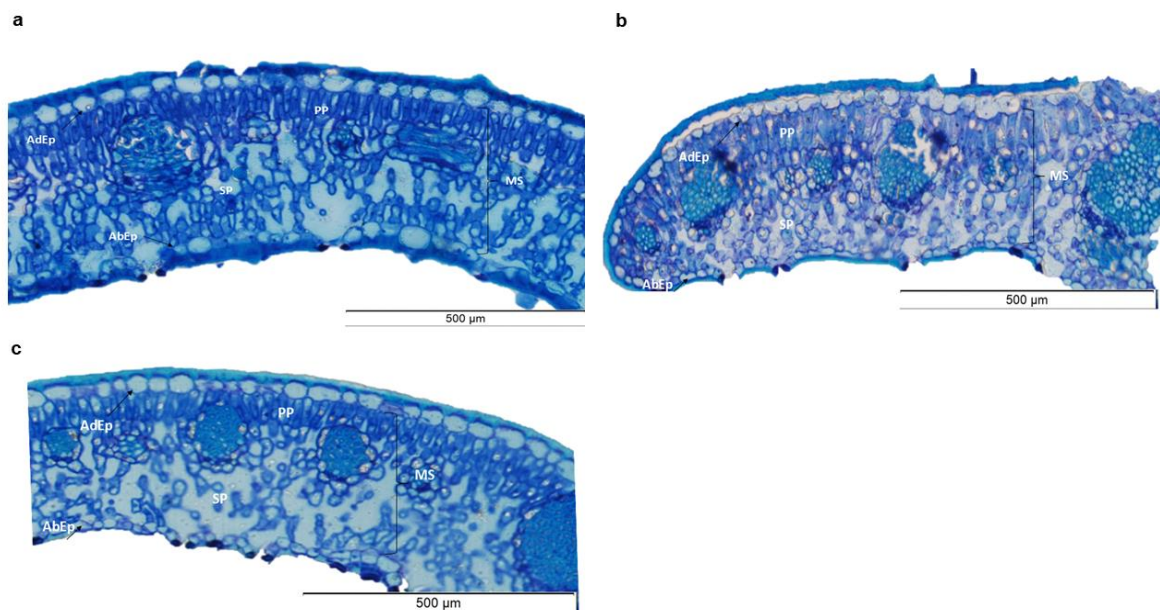


Fig. 3: Corte transversal do mesofilo (MS) de folhas de *Anemopaegma arvense* mostrando a epiderme adaxial (AdEp), epiderme abaxial (AbEp), parênquima paliçádico

(PP) e parênquima esponjoso (SP). Os cortes anatômicos foram realizados em folhas coletadas no início da seca (S_I) (a), fim da seca (S_F) (b) e estação chuvosa (C) (c).

Não houve diferença significativa na espessura da epiderme adaxial (AdEp) no início da estação seca (S_I), embora no final da seca (S_F) a AdEp tenha sido mais espessa do que na estação chuvosa (C) (Fig. 3 a-c e Fig. 4 a). A espessura da epiderme abaxial (AbEp) não apresentou diferenças entre as estações (Fig. 3 a-c e Fig. 4 b). Não houve diferenças na espessura do parênquima paliçádico (PP, Fig. 4 c), parênquima esponjoso (SP) (Fig. 4 d), mesofilo (MS) (Fig. 4 e) e espessura foliar (LT) (Fig. 4 f) entre o início da seca e a estação chuvosa (S_I e C). Entre S_F e C, no entanto, esses mesmos parâmetros aumentaram em 15,82%, 14,21%, 21,66% e 16,56%, respectivamente.

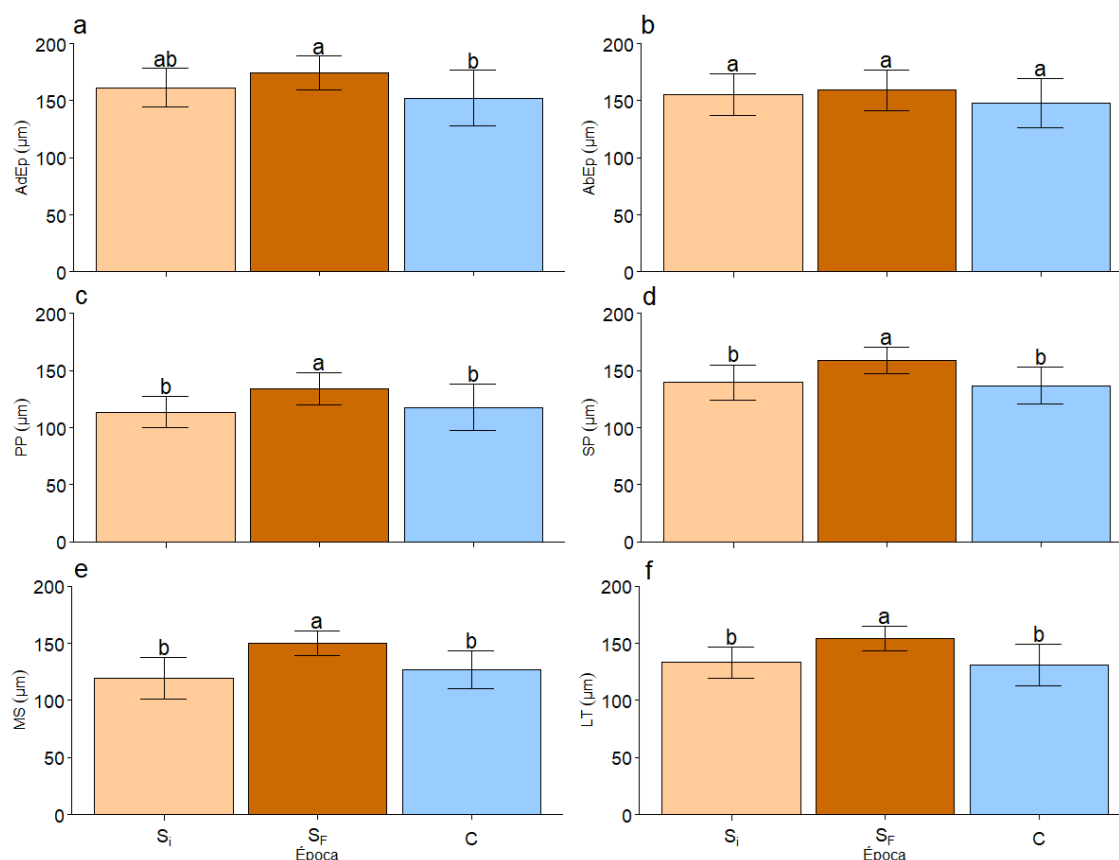


Fig. 4: Espessura da epiderme adaxial (AdEp) (a), abaxial (AbEp) (b), parênquima paliçádico (PP) (c), parênquima esponjoso (SP) (d), mesofilo (MS) (e) e espessura da folha (LT) (f) de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

A impressão epidérmica demonstrou que as folhas de *A. arvense* apresentam estômatos somente na face abaxial (Fig. 5 a-b) e tricomas em ambas as faces. Não foram observadas diferenças significativas na densidade estômatos (Fig. 6 a). No entanto, foi

observado maior comprimento dos estômatos no final da seca (S_F), com redução no período chuvoso (C) (Fig. 6 b).

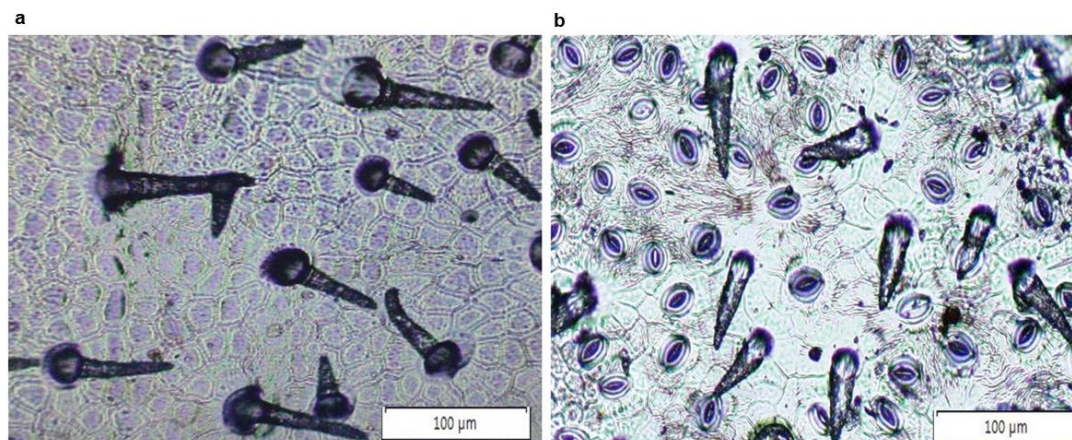


Fig. 5: Faces adaxial (a) e abaxial (b) de plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*).

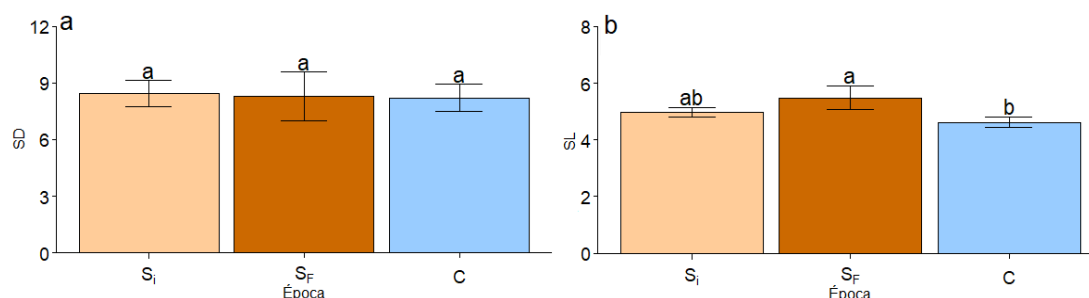


Fig. 6: Densidade (a) e comprimento dos estômatos (b) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

3.3.3 Fluorescência da clorofila a

O rendimento quântico potencial do PSII (F_V/F_M) manteve-se com valores semelhantes nas épocas S_I e C (início da seca e chuvosa), mas reduziu no S_F (final da seca), possivelmente por causa da menor disponibilidade hídrica nesse período (Fig. 7 a). Não foram observadas diferenças significativas no $PSi-o$, Φ_{Eo} , TRo/RC e ETo/RC , que representam o fluxo de elétrons e a taxa máxima de captura do PSII (Fig. 7 b-e). Por outro lado, o índice de desempenho fotossintético (PI_{ABS}) foi menor no final da seca (S_F) com posterior recuperação na época chuvosa (C) (Fig. 7 f). Em resposta a redução de PI_{ABS} , no final da seca (S_F), houve aumento na dissipação do excesso de energia como observado no ABS/RC , Φ_{D0} e Dio/RC (Fig. 8 a-c).

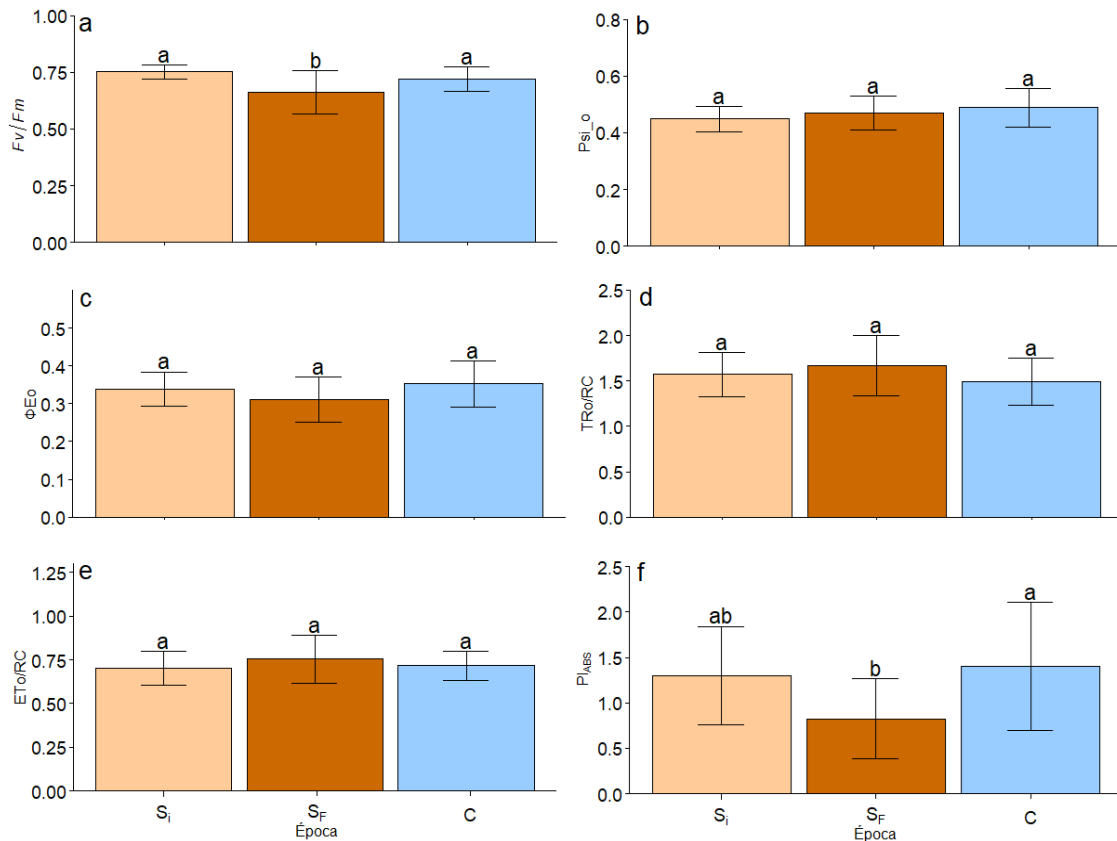


Fig. 7: Rendimento quântico do fotossistema II (F_v/F_m) (a), da probabilidade de em $t = 0$ um éxciton aprisionado mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após a Quinona A (Qa) ($\Psi_{s,0}$) (b), probabilidade de um éxciton mover um elétron pela cadeia transportadora de elétrons após a Qa (Φ_{E0}) (c), taxa máxima de captura do Fotossistema II (TRo/RC) (d), fluxo de transporte de elétrons por centro de reação (ET_o/RC) (e) e índice de desempenho fotossintético (PI_{ABS}) (f) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_i), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

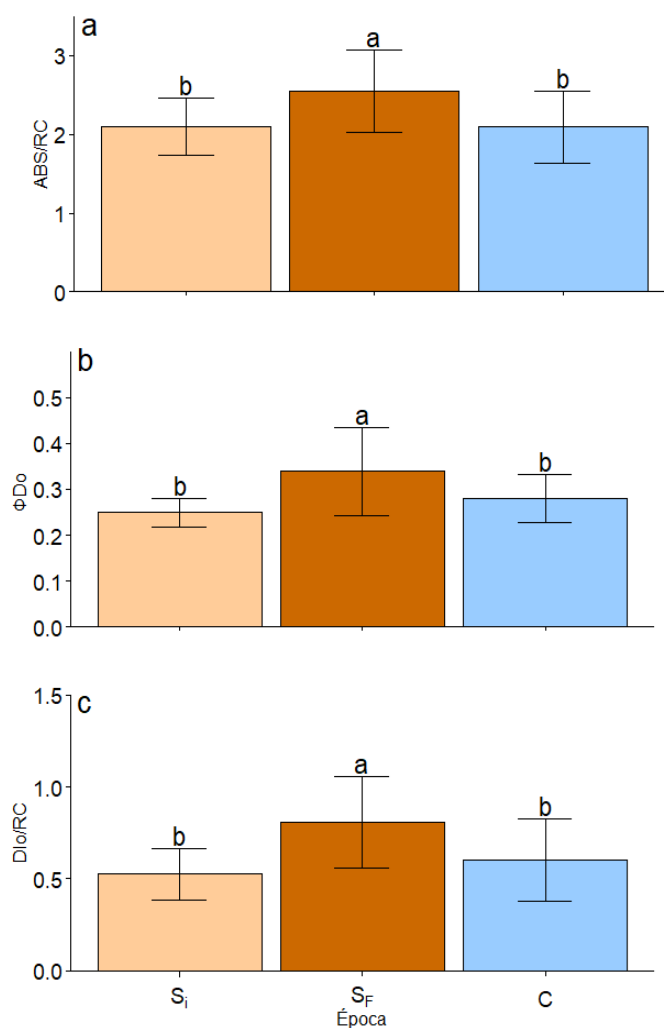


Fig. 8: Fluxo específico de energia luminosa por centro de reação (ABS/RC) (a), Rendimento quântico da dissipação de energia na forma de calor (Φ_{Do}) (b) e Fluxo específico de dissipação de energia na forma de calor (Dio/RC) (c) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

3.3.4 Trocas gasosas

O período de seca (S_I e S_F) influenciou nas trocas gasosas de *Anemopaegma arvense*. A taxa líquida de assimilação de carbono (A), a condutância estomática (g_s) e a taxa respiratória (R_n) apresentaram comportamento similares, com maiores valores no início da seca (S_I) e queda em S_F, que se manteve durante a época chuvosa (C) (Fig. 9 a-b). A relação entre a taxa fotossintética e respiração noturna não apresentou diferenças significativas entre as épocas avaliadas (Fig. 9 c-d).

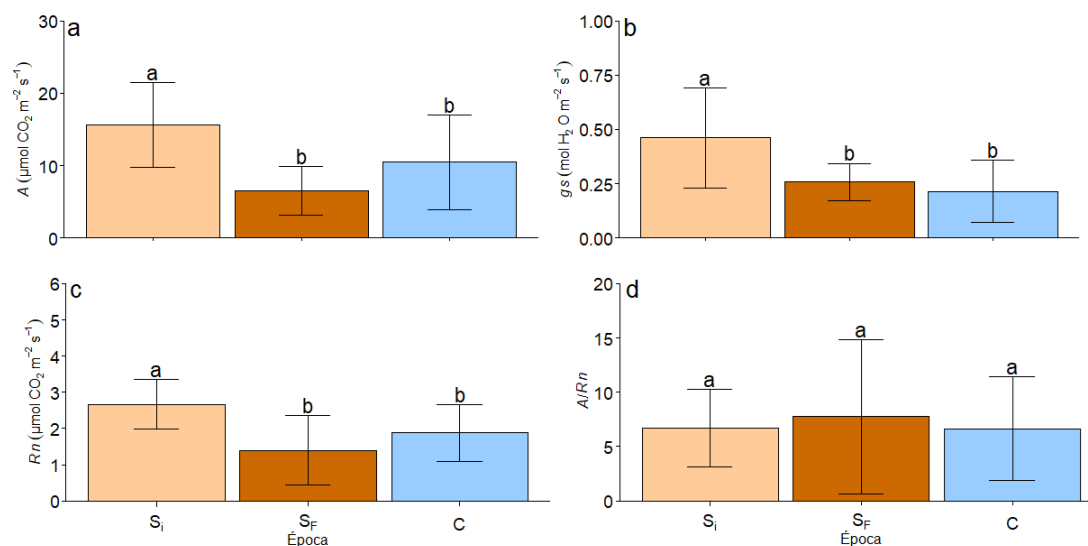


Figura 9: Taxa fotossintética (A) (a), condutância estomática (g_s) (b), Respiração noturna (R_n) (c) e Relação entre taxa fotossintética e respiração noturna (A/R_n) (d) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

3.3.5 Danos celulares e atividade de enzimas antioxidantes em função da sazonalidade de *A. arvense*

As mudanças na sazonalidade do ambiente influenciaram a produção das espécies reativas de oxigênio (ROS) e maior teor de MDA foi evidenciado durante o período mais seco (S_F) (Fig. 6 a). O aumento em MDA resultou na ativação da atividade das enzimas antioxidantes de defesa em resposta ao estresse oxidativo. A estação seca (S_I e S_F) induziu maior atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (Fig. 9 b). Além da SOD, em S_F também se observou maior ação das enzimas catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX). Durante o período chuvoso, os valores de SOD, CAT, APX e MDA reduziram em comparação com a seca (Fig 9).

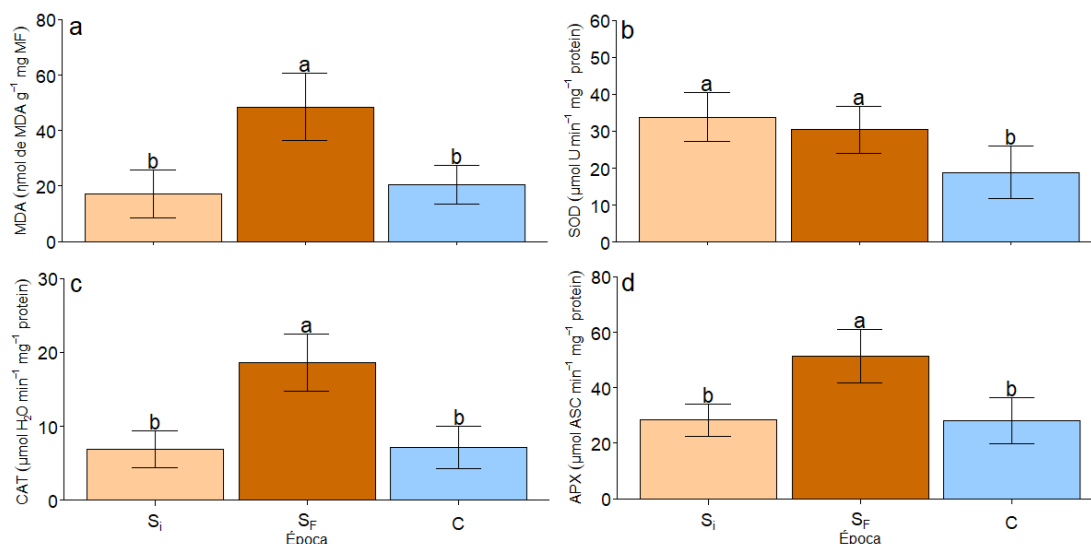


Fig. 10: Atividade do Malondialdeído (MDA) (a) e das Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) Superóxido Dismutase (SOD) (b), Catalase (CAT) (c) e Ascorbato peroxidase (APX) (d) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S₁), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

3.4 Discussão

Neste estudo, foram evidenciados que as mudanças sazonais, como a estação seca e chuvosa, influenciaram nas respostas fisiológicas de plantas de *Anemopaegma arvense*, desencadeando estratégias para recuperar a homeostase redox e tolerar a redução da disponibilidade hídrica. Eventos de restrição hídrica ativam vias de sinalização das raízes para a parte aérea da planta, resultando no fechamento estomático para minimizar a perda de água, e na manutenção do Ψ_w foliar (Kaur et al. 2021). No Cerrado, as plantas podem apresentar comportamento fisiológico sazonal, como a manutenção do Ψ_w (Bucci et al. 2004; Jancoski et al. 2021), para sustentar o crescimento e a sobrevivência.

Estudos anteriores indicam que as variações sazonais no Ψ_w ao amanhecer podem refletir a profundidade das raízes, sugerindo que raízes mais profundas podem manter um Ψ_w mais elevado durante períodos secos (Brum et al. 2017; Choat et al. 2018). Essa adaptação é atribuída as mudanças temporais e espaciais nos padrões de absorção de água (Behzad et al. 2023). A *Anemopaegma arvense* possui xilopódio que pode atingir um metro ou mais de profundidade (Ferraro et al. 2021), demonstrando a adaptação a ambientes com menor disponibilidade de água (Kuster et al. 2017).

Além disso, sob condições de baixa disponibilidade hídrica, as plantas alteram as estruturas anatômicas à nível celular para lidar com o estresse (Yavas et al. 2024). No final da seca (S_F), foi observado aumento na espessura da AdEp, SP, PP, MS e LT,

indicando maior engrossamento da folha durante o período de maior déficit hídrico. Esse aumento na espessura dos tecidos permite regular a perda de água (Araújo et al. 2021) e sugere adaptações ópticas para filtrar e/ou espalhar o excesso de luz nos tecidos foliares, protegendo contra os danos excessivos de luz (Karabourniotis et al. 2021).

As estruturas estomáticas, que desempenham papel crucial na resposta das plantas à disponibilidade hídrica, também apresentam grande sensibilidade às variações sazonais ambientais (Zoulias et al. 2020). As folhas de *Anemopaegma arvense*, são hipoestomáticas, apresentando estômatos apenas na face abaxial (Fig. 5). Esse arranjo, associado às adaptações anatômicas, é importante para plantas em ambientes com grandes oscilações estacionais, pois reduz a exposição dos estômatos à radiação solar, minimizando a perda de água durante a transpiração (Drake et al. 2019; Richardson et al. 2020). No entanto, o impacto da disponibilidade de água no desenvolvimento estomático não é totalmente compreendido e merece mais estudos, pois as respostas podem variar entre as espécies (Buckley 2019). Neste estudo, foi observado que não houve variação na densidade e no comprimento dos estômatos durante as épocas estudadas, similar ao encontrado por Gerardin et al. (2018), Bertolino et al. (2019) e Araújo et al. (2021).

Embora os estudos que descrevem variação temporal e sazonal nas características funcionais e anatômicas das folhas de espécies do Cerrado ainda sejam limitados, devido ao desafio de monitorar as folhas ao longo do tempo (Araújo et al. 2021), a pouca variação na densidade estomática ao longo das estações pode ser explicada pela plasticidade foliar da espécie. Essa plasticidade permite equilíbrio entre o número de estômatos por mm^2 e área foliar (Xu et al. 2008), ou ainda pela variação na luminosidade do ambiente (Melo Jr e Boeger 2016).

Em geral, à medida que o déficit hídrico do solo aumenta, o desempenho fotossintético das plantas demonstra plasticidade importante em relação às mudanças sazonais. O período de seca (S_F) influenciou diretamente maior número de características morfoanatômicas, bioquímicas e variáveis relacionadas a eficiência fotoquímica (E_t/RC , DI_o/RC , ΦD_o e ABS/RC) (Fig. 10). A complexidade do maquinário fotossintético, está constantemente submetida a alterações ambientais, e as plantas respondem justamente modificando as estruturas morfológicas e metabolismos fisiológicos (Chauhan et al. 2023; Sharma et al. 2019; Sun et al. 2023), reforçando a plasticidade adaptativa da espécie nativa do Cerrado. As plantas podem reduzir F_v/F_m para minimizar a produção de ROS (Umar e Siddiqui 2020). A *A. arvense* reduziu F_v/F_m

e o PI_{ABS} ao final da estação seca (S_F) (Fig. 7 a, f), no entanto, os resultados indicam que embora o desempenho fotossintético tenha diminuído, essa redução não provocou danos ao aparato fotossintético (Ali et al. 2021; Wang et al. 2022).

Embora, os fluxos de energia específicos para o transporte de elétrons (Ψ_o , Φ_{Eo} , TR_o/RC e ET_o/RC) tenha se mantido estáveis ao longo dos períodos avaliados (González et al. 2021; Simkin et al. 2022), a menor condutância estomática (g_s) e a redução na taxa de assimilação de CO_2 (A) sugerem que a limitação estomática contribuiu para a diminuição da eficiência fotossintética. Com o excesso de energia proveniente do transporte de elétrons, o aumento na ABS/RC , Dio/RC e Φ_{Do} , mostra a ativação de mecanismos de dissipação do excesso de energia luminosa na forma de calor, para proteger o aparato fotossintético (Hu et al. 2023, Magdaong e Blankenship 2018; Oliveira et al. 2022; Sidiqi 2022). Durante a estação chuvosa, observou-se recuperação nas variáveis consideradas como índices de vitalidade do aparato fotossintético, como PI_{ABS} e Φ_{Eo} . Resultados semelhantes foram encontrados por diferentes autores (Lee et al. 2022; Koutra et al. 2022; Zhang et al. 2021), indicando que *A. arvense* pode adaptar-se às variações sazonais através de ajustes nas respostas fisiológicas para garantir a funcionalidade fotossintética.

A redução na respiração noturna (R_n) das plantas, no final da seca (agosto), corrobora com estudos que relatam essa diminuição em condições de seca severa (Fu et al. 2020; Tombesi et al. 2021). A redução da R_n em condições de déficit hídrico pode estar relacionada à redução de carboidratos causadas pela diminuição da atividade fotossintética (Tombesi et al. 2021; Zufferey 2016), também observada neste estudo (Fig. 9-a). Curiosamente, no mês de janeiro, durante a estação chuvosa, a R_n permaneceu baixa, contrastando com estudos que indicam aumento da respiração noturna com maior disponibilidade hídrica (Ayub et al. 2011; Collins et al. 2021). Essas variações podem estar ligadas a respostas estomáticas mais lentas (Yan et al. 2023) ou a fatores ambientais e biológicos específicos de *A. arvense*, que merecem maior investigação em estudos futuros.

Apesar dos mecanismos de defesa para atenuar os danos fotossintéticos, o estresse fotooxidativo provocado pelo período de seca foi evidenciado pelo aumento de MDA em S_F , um marcador amplamente utilizado para identificar danos celulares resultantes da peroxidação lipídica (Chiappero et al. 2021). Durante períodos de estresse, como a seca, a produção em excesso de EROs destrói membranas celulares e cloroplastos, contribuindo para o aumento de MDA (Hou et al. 2021; Liang et al. 2022;

Morales e Munné-Bosch 2019; Yalcinkaya et al. 2019). Para manter o equilíbrio redox do metabolismo celular e mitigar os danos causados pelas EROs, *A. Arvense* ativou as defesas antioxidantes, aumentando a atividade das enzimas SOD, CAT e APX (Fig. 9 a, b e c). Esse comportamento é típico de plantas tolerantes à seca, que apresentam maior atividade dessas enzimas em resposta ao estresse oxidativo (Hassan et al. 2021; Santos et al. 2022; Sarker e Oba, 2018). A SOD que atua como a primeira na linha de defesa ao eliminar radicais ânions superóxidos ($O_2^{\cdot-}$) e oxigênio singleto (1O_2) (Zhanassova et al. 2021), mostrou maior atividade no início da seca (S_1) e no final de seca S_F , destacando a importância desta enzima.

CAT e a APX são enzimas-chave na eliminação e desintoxicação de peróxidos de hidrogênio (H_2O_2) gerado após a dismutação das EROs pela SOD (Hasanuzzaman et al. 2020; Zandalina et al. 2022). Neste estudo, observou-se o aumento na atividade das enzimas CAT e APX em *A. Arvense* em S_F . Dessa forma, a ativação do sistema antioxidante, incluindo as enzimas SOD, CAT e APX, foi significativamente maior no período mais seco, ocorrido em agosto, em resposta ao aumento nos níveis de MDA. Sugerindo um esforço concertado da planta para eliminar e desintoxicar as EROs (Sen 2023). Por outro lado, durante a estação chuvosa, os níveis de MDA, assim como a atividade das enzimas SOD, CAT e APX, foram reduzidos, indicando que *A. arvense* conseguiu superar o período de estresse hídrico. Essa variação sazonal na atividade antioxidante reforça a resiliência da planta em lidar com as mudanças climáticas e atravessar as diferentes estações, garantindo a sobrevivência tanto em períodos secos quanto chuvosos.

A adaptação das plantas às mudanças climáticas em seu habitat natural é o principal responsável pela sobrevivência em diferentes condições sobretudo em cenário global indicando secas mais intensas e frequentes incluindo regiões do domínio Cerrado (Hofmann et al. 2021; Sankaran 2019). O desenvolvimento de táticas adaptativas para evitar ou tolerar os efeitos adversos da sazonalidade e alterações ambientais, inclui as defesas celulares, fisiológicas, morfoanatômicas e bioquímicas (Gupta 2020). Conhecer essa capacidade de resposta contribui significativamente para entender a dinâmica das espécies nos ambientes e para subsídios, a partir de espécies nativas que poderão auxiliar os programas de melhoramento de plantas de interesse agrônomico ou ecológico (Yadav et al. 2021). Nesse contexto, os resultados apontam que *A. arvense* mostra-se resiliente perante as alterações sazonais e o conhecimento sobre as respostas fisiológicas, anatômicas e bioquímicas encontrados ajuda a entender o comportamento da planta,

possibilitando estruturar planos de manejo mediante o contexto das mudanças climáticas.

3.5 Conclusão

Os resultados mostraram que a *Anemopaegma arvense* é uma espécie nativa com notável adaptação as condições sazonais do Cerrado, mantendo os fluxos de energia necessários para a manutenção do aparato fotossintético. Embora o desempenho fotossintético reduzido (A e PI_{ABS}), a espécie continuou ativando mecanismos de defesa para tolerar o período intenso de seca. Esse comportamento foi pela ativação de mecanismos bioquímicos (ativação das enzimas antioxidantes SOD, CAT e APX) e anatômicos, como o aumento da espessura da epiderme adaxial e a presença de estômatos apenas nessa face foliar, o que pode contribuir para redução da perda de água. Além disso, os ajustes nos tecidos parenquimáticos e no mesofilo, durante a estação mais seca, pode ter minimizado o consumo de recursos como água e intensidade de luz. Portanto, *A. arvense* apresenta mecanismos de respostas ao déficit hídrico para tolerar os efeitos da sazonalidade do ambiente ao qual está inserida e garantir a sobrevivência mesmo em condições de eventos de seca cada vez mais intensos.

3.6 Referências

- Alencar, AZ., Shimbo, J., Lenti, F., Marques, BC., Zimbres, B., Rosa, M., Arruda, V., Castro, I., Ribeiro, JPFM., Varela, V., Alencar, I., Piontekowski, V., Ribeiro, V., Bustamante, MMC., Sano, EE., Barroso, M. (2020) Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using landsat data processed in the Google Earth Engine platform. *Remote Sens.* doi:10.3390/rs12060924.
- Ali, F., Umar, M., Siddiqui, ZS. (2021) Comparative physiological assessment of some edible oil-seed crops under drought stress environment using fluorescence and IR imaging techniques. *Pak. J. Bot.*, 53(4): doi:10.30848/PJB2021-4(13).
- Anderson, MD., Prasad, TK., Stewart, CR. (1995) Changes in Isozyme Profiles of Catalase, Peroxidase, and Glutathione Reductase during Acclimation to Chilling in Mesocotyls of Maize Seedlings. *Plant Physiol.* 109, 1247. doi: 10.1104/PP.109.4.1247.
- Andrade, MT., Oliveira, LA., Pereira, TS., Cardoso, AA., Batista-Silva, W., DaMatta, FM., Zsögön, A., Martins, SCV. (2022) Impaired auxin signaling increases vein and stomatal density but reduces hydraulic efficiency and ultimately net photosynthesis. *Journal of Experimental Botany.* Volume 73, Issue 12. doi: 10.1093/jxb/erac119.
- Araújo, I., Marimon, BS., Scalon, MC., Cruz, WJA., Fauset, S., Vieira, TCS., Galbraith, DR., Gloor, M.U. (2021) Intraspecific variation in leaf traits facilitates the occurrence of trees at the Amazonia–Cerrado transition. *Flora.* 279. doi: 10.1016/j.flora.2021.151829.

Ayub G, Smith RA, Tissue DT, Atkin OK. (2011) Impacts of drought on leaf respiration in darkness and light in *Eucalyptus saligna* exposed to industrial-age atmospheric CO₂ and growth temperature. *New Phytol.* 190(4). doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03673.x.

Barros, V., Melo, A., Santos, M., Nogueira, L., Frosi, G., Santos, MG. (2020) Different resource-use strategies of invasive and native woody species from a seasonally dry tropical forest under drought stress and recovery. *Plant Physiology and Biochemistry* 147. doi: 10.1016/j.plaphy.2019.12.018.

Bashir, SS., Hussain, A., Hussain, SJ., Wani, AO., Zahid Nabi, S., Dar, NA., Baloch, FS., Mansoor, S. (2021) Plant drought stress tolerance: understanding its physiological, biochemical and molecular mechanisms. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 35(1). doi: 10.1080/13102818.2021.2020161.

Beauchamp, C., Fridovich, I. (1971). Superoxide dismutase: Improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Anal. Biochem.* 44, 276–287. doi: 10.1016/0003-2697(71)90370-8.

Behzad, HM., Muhammad, A., Duan, S., Kavousi, A., Cao, M., Liu, J., Jiang, Y. (2023) Seasonal variations in water uptake and transpiration for plants in a karst critical zone in China. *Science of the Total Environment.* 860 (20). doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160424.

Bertolino, LT., Caine, RS., Gray, JE. (2019) Impact of Stomatal Density and Morphology on Water-Use Efficiency in a Changing World. *Front. Plant Sci.* 10:225. doi: 10.3389/fpls.2019.00225.

Bradford, MM. (1976) A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72. doi:10.1006/ABIO.1976.9999.

Brum, M., Teodoro, GS., Abrahao, A., Oliveira, RS. (2017) Coordination of rooting depth and leaf hydraulic traits defines drought-related strategies in the campos rupestres, a tropical montane biodiversity hotspot. *Plant and Soil*, 420 (1-2). doi: 10.1007/s11104-017-3330-x.

Bucci, SJ., Goldstein, G., Meinzer, FC., Scholz, FG., Franco, AC., Bustamante, M. (2004) Functional convergence in hydraulic architecture and water relations of tropical savanna trees: from leaf to whole plant. *Tree Physiology.* 24(8). doi:10.1093/treephys/24.8.891.

Buckley, TN. (2019) How do stomata respond to water status?. *New Phytol*, 224: 21-36. doi:10.1111/nph.15899.

Cakmak, I., Horst, WJ. (1991) Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiol. Plant.* 83. doi:10.1111/J.1399-3054.1991.TB00121.X.

Chaudhry, S., Sidhu, GPS. (2022) Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: a comprehensive review. *Plant Cell.* doi:10.1007/s00299-021-02759-5.

Chauhan, J., Prathibha, MD., Sing, P., Choyal, P., Mishra, NU., Saha, D., Kumar, R., Anuragi, H., Dey, SP., Bose, B., DeyP., Dwivedi, KK., Gupta, NK., Singal, RK. Plant photosynthesis under abiotic stresses: Damages, adaptive, and signaling mechanisms. *Plant Stress*. doi: 10.1016/j.stress.2023.100296.

Chen, R., Xiaotao, H., Dianyu, C., Wene, W., Jingbo, Z., Tianyuan, S. (2023) Individual and combined effects of heat and drought and subsequent recovery on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) photosynthesis, nitrogen metabolism, cell osmoregulation, and yield formation. *Plant Physiology and Biochemistry*. doi: 10.1016/j.plaphy.2023.01.038.

Chiappero, J., Cappellari, LR., Palermo, TB., Giordano, W., Khan, N., Banchio, E. (2021) Antioxidant status of medicinal and aromatic plants under the influence of growth-promoting rhizobacteria and osmotic stress. *Industrial Crops and Products*. doi:10.1016/j.indcrop.2021.113541.

Choat, B., Brodribb, TJ., Brodersen, CR., Duursnam RA., López R., Medlyn, BE. (2018) Triggers of tree mortality under drought. *Nature*. doi:10.1038/s41586-018-0240-x.

Colli, GR., Vieira, CR., Dianese, JC. (2020) Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. *Biodivers Conserv*. 29. doi: 10.1007/s10531-020-01967-x.

Collins, B., Chapman, S., Hammer, G., Chenu, K. (2021) Limiting transpiration rate in high evaporative demand conditions to improve Australian wheat productivity. *Silico Plants*. doi: 10.1093/insilicoplants/diab006.

Costa-Coutinho, JM., Jardim, MAG., Miranda, LS., Castro, AAJ. (2022) Climate change effects on marginal savannas from central-north Brazil. *An Acad. Bras. Cienc*. doi: 10.1590/0001-376520220210191.

Debona, D., Rodrigues, FA., Rios, JÁ., Nascimento, KJT. (2012) Biochemical Changes in the Leaves of Wheat Plants Infected by *Pyricularia oryzae*. doi: 10.1094/PHYTO-06-12-0125-R.

Deepak, SB., Thakur, A., Singh, S., Bakshi, M., Bansal, S. (2019) Changes in crop physiology under drought stress: A review. *J. Pharmacogn. Phytochem*.

Del Longo, OT., González, CA., Pastori, GM., Trippi, VS. (1993) Antioxidant Defences under Hyperoxygenic and Hyperosmotic Conditions in Leaves of Two Lines of Maize with Differential Sensitivity to Drought. *Plant Cell Physiol*. 34. doi: 10.1093/OXFORDJOURNALS.PCP.A078515.

Drake, P.L., Boer, HJ., Schymanski, SJ., Veneklaas, EJ. (2018) Two sides to Every leaf: water and CO₂ transport in hypostomatous and amphistomatous leaves. *New Phytologist* doi:10.1111/nph.15652.

Ferraro, A. Silva, GS., Aguiar, CL., Apezato-da-Glória, B. 2021. Evaluating belowground bud banks of native species from Cerrado: Structural, chemical, and ecological approaches. *Flora*. doi:10.1016/j.flora.2021.151852.

Ferreira, RB., Parreira, MR., Nabout, JC. (2022) Is there concordance between Science and Technology in Natural Science? Mapping the relationship among number of papers and patents from research on Cerrado plants. World Patent Information. doi:10.1016/j.wpi.2022.102108.

Filardi, FLR., Barros, FD., Baumgratz, JFA., Bicudo, CEM., Cavalcanti TB., Coelho, MAN. Et al (2018) Brazilian Flora 2020: innovation and collaboration to meet Target 1 of the Global Strategy for Plant Conservation (GSPC). Rodriguésia. doi:10.1590/2175-7860201869402.

Firetti, F., Zuntini, AR., Gaiarsa, WJ., Oliveira, RS., Lohmann, LG., Sluys, MAV. (2017) Complete chloroplast genome sequences contribute to plant species delimitation: A case study of the *Anemopaegma* species complex. American Journal of Botany. doi: 10.3732/ajb.1700302.

Fox, J., Weisber, S. Na (R). (2019) Companion to Applied Regression, Third Editions
Thousand Oaks CA: Sage.
<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/2019>

Fu-Z., Ciais, PC., Bastos, A., Stoy, PC., Yang, H., Verde, JK., Wag, B., Yu, K., Huang, Y., Knohl, A., Sintestino, L., Gharun, M., Cuntz, M., Arriga, N., Roland, M., Peichl, M., Migliavacca, M., la Motte, G., Fares, S., Buchmann, N., El-Madany, TS., Pitacco, A., Vendrame, N., Li, Z., Vincke, C., Magliulo, E., Koebsch, F. (2020) Sensitivity of gross primary productivity to climatic drivers during the summer drought of 2018 in Europe. Phil. Trans. R. Soc. doi:10.1098/rstb.2019.0747.

Gerardin, T., Douthe, C., Flexas, J., Brendel, O. (2018) Shade and drought growth conditions strongly impact dynamic responses of stomata to variations in irradiance in *Nicotiana tabacum*. Environmental and Experimental Botany (153). doi:10.1016/j.envexpbot.2018.05.019.

Ghadirnezhad Shiade, SR., Fathi, A., Taghavi, FG., Amiri, E., Pessarakli, M. (2022) Plants' responses under drought stress conditions: Effects of strategic management approaches—a review. Journal of Plant Nutrition (46). doi: 10.1080/01904167;2022.2105720.

González, MC.; Cejudo, FJ.; Sahrawy, M.; Serrato, AJ. (2021) Current Knowledge on Mechanisms Preventing Photosynthesis Redox Imbalance in Plants. 10. doi:10.3390/antiox10111789.

Grossman, JJ. (2022) Phenological physiology: seasonal patterns of plant stress tolerance in a changing climate. New Phytologist. doi: 10.1111/nph.18617.

Gupta, R., Sharma, RD., Rao, YR., Siddiqui, ZH., Verma, A., Ansari, MW., Rakwale, R., Tujeta, N. (2020) Acclimationa potential of noni (*Morinda citrifolia* L.)plant to temperature stress is mediated throught photosynthetic eletron transport rate. Plant Signaling & Behavior (16). doi:10.1080/15592324.2020.1865687.

Hasanuzzaman, M., Bhuvan, BMHM., Parvin, K., Bhuvan, TF., Anee, TI., Nahar, K., Hossen, MDS., Zulfiqar, F., Alam, MM., Fujita, M. (2020) Regulation of ROS Metabolism in Plants under Environmental Stress: A Review of Recent Experimental Evidence. *International Journal of Molecular Sciences*. doi: 10.3390/ijms21228695.

Hassan M., Israr M., Mansoor S., Hussain AS., Basheer F., Azizullah A., et al. (2021) Acclimation of cadmium-induced genotoxicity and oxidative stress in mung bean seedlings by priming effect of phytohormones and proline. *PLoS ONE* 16(9): doi:10.1371/journal.pone.0257924.

Havir, EA., McHale, NA. (1987) Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. *Plant Physiol.* 84. doi: 10.1104/PP.84.2.450.

Hofmann, GS., Cardoso, MF., Alves, RJV., Weber, EJ., Barbosa, AA., Toledo, PM., Pontual, FB, Salles, LDO., Hasenack, H. Cordeiro, JLP., Aquino, FE., Oliveira, LFB. (2021) The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Global Change Biology*, 27. doi:10.1111/gcb.15712.

Hou, P., Wang, F., Luo, B., Li, A., Wang, C., Shabala, L., Ahmed, HAI., Deng, S., Zhang, H., Song, P., Zhang, Y., Shabala, S., Chen, L. (2021) Antioxidant Enzymatic Activity and Osmotic Adjustment as Components of the Drought Tolerance Mechanism in *Carex duriuscula*. *Plants*. doi:10.3390/plants10030436.

Hu, F., Zhang, Y., Guo, J. (2023) Effects of drought stress on photosynthetic physiological characteristics, leaf microstructure, and related gene expression of yellow horn. *Plant Signal Behav.* doi: 10.1080/15592324.2023.2215025.

Hura, T., Hura, K., Ostrowska, A. (2022) Drought-Stress Induced Physiological and Molecular Changes in Plants. *Int. J. Mol. Sci.* doi: 10.3390/ijms23094698.

Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N. Hazrat, A., Khan, AH., Fahad, S., Khan, A., Ullah, A. (2021) Drought Tolerance Strategies in Plants: A Mechanistic Approach. *J Plant Growth Regul.* doi:10.1007/s00344-020-10174-5.

Jancoski, HS., Marimon, BS., Scalon, MC., Barros, FV., Manimon-Junior, BH, Carvalho, E., Oliveira, RS., Menor, IO. (2021) Distinct leaf water potential regulation of tree species and vegetation types across the Cerrado–Amazonia transition. *Biotropica*. doi:10.1111/btp.13064.

Johansen, D.A. (1940). *Plant Micro Technique*. McGraw-Hill, New York.

Kassambara, A., Mundt, F. (2020) *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses*. R package version 1.0.7, <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.

Karabourniotis, G., Liakopoulos, G., Bresta, P., Nikolopoulos, D. (2021) The Optical Properties of Leaf Structural Elements and Their Contribution to Photosynthetic Performance and Photoprotection. *Plants* 10(7). doi: 10.3390/plants10071455.

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.* doi:10.3390/app10165692.

Kaur, H., Kohli, SK., Khanna, K., Bhardwai, R. (2021) Scrutinizing the impact of water deficit in plants: Transcriptional regulation, signaling, photosynthetic efficacy, and management. *Physiologia Plantarum*. doi: 10.1111/ppl.13389.

Koutra, E., Chondrongiannis, C., Grammatikopoulos, G. (2022) Variability of the photosynthetic machinery tolerance when imposed to rapidly or slowly imposed dehydration in native Mediterranean plants. *Photosynthetica* 60. doi: 10.32615/ps.2022.003.

Kuhn, N., Tovar, C., Carretero, J., Vandvik, V., Enquist, BJ., Willis, KJ. (2021). Globally important plant functional traits for coping with climate change. *Frontiers of Biogeography*. doi:10.21425/F5FBG53774.

Kuster, VC., Castro, SAB., Vale, FHA. (2017) Environmental conditions modulate plasticity in the physiological responses of three plant species of the neotropical savannah. *Acta Physiol Plant*. doi: 10.1007/s11738-017-2399-4.

Lambers, H., de Britto Costa, P., Oliveira, RS., Oliveira, FAO. (2020). Towards more sustainable cropping systems: lessons from native Cerrado species. *Theor. Exp. Plant Physiol*. doi:10.1007/s40626-020-00180-z.

Le, S.; Josse, J.; Husson, F. (2008) FactoMineR: Na R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical. Software*, 25(1). doi: 10.18637/jss.v025.i01.

Lee, KC., Kweon, H., Sung, JW., Kim, YG, Cha, S., Koo, N. (2022). Physiological response analysis for the diagnosis of drought and waterlogging damage in *Prunus yedoensis*. *Forest Science and Technology* 18(1). Doi:10.1080/21580103.2022.2035829.

Lenth, R. (2022) Emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means_. R package version 1.7.5. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.

Liang, X., Qian, R., Wang, D., Liu, L., Sun, C., Lin, X. (2022) Lipid-Derived Aldehydes: New Key Mediators of Plant Growth and Stress Responses. *Biology*. doi: 10.3390/biology11111590.

Libonati, R., Geirinhas, JL., Silva, OS., Santos, DM., Rodrigues, JÁ., Russo, A., Peres, LF., Narcizo, L., Gomes, MER., Rodrigues, AP., DaCamara, CC., Pereira, JMC., Trigo, RM. (2022) Drought–heatwave nexus in Brazil and related impacts on health and fires: a comprehensive review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v.1517. doi:10.1111/nyas.14887.

Machado, RB., Aguiar, LMS., Silva, JMC. (2023) Brazil: plan for zero vegetation loss in the Cerrado. *Nature*. doi: 10.1038/d41586-023-00681-2.

Machado, RB., Aguiar, LMS., Bustamante, MMC. (2024) Why is it so easy to undergo devegetation in the Brazilian Cerrado?. *Perspectives in Ecology and Conservation*. doi: doi.org/10.1016/j.pecon.2024.08.003.

Magdaong, NCM., Blakenship, RE. (2018) Photoprotective, excited-state quenching mechanisms in diverse photosynthetic organisms. *Journal of Biological Chemistry*. doi: 10.1074/jbc.TM117.000233.

Marengo, JA., Jimenez, J.C., Espinoza, J.C., Cunha, AP., Aragão, LEO. (2022) Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Sci Rep*. doi:10.1038/s41598-021-04241-4.

Melo Junior, CF., Boeger, MRT. (2016) Leaf traits and plastic potential of plant species in a light-edaphic gradient in restinga in Southern Brazil. *Acta Biológica Colombiana*. doi: 10.15446/abc.v21n1.47621.

Morales, M., Munné-Bosh, S. (2019) Malondialdehyde: Facts and Artifacts. *Plant Physiol*. doi:10.1104/pp.19.00405.

Nakano, Y., Asada, K. (1981) Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts. *Plant Cell Physiol*. 22, 867–880. doi: 10.1093/OXFORDJOURNALS.PCP.A076232.

O'Brien, T P., Feder, N., McCully, ME. (1964). Polychromatic staining of plant cell walls by toluidine blue. *Protoplasma* 59: 368-373. doi: 10.1007/BF01248568.

Oguz, MC., Aycan, M., Oguz, E., Poyraz, I., Yildiz M. (2022) Drought Stress Tolerance in Plants: Interplay of Molecular, Biochemical and Physiological Responses in Important Development Stages. *Physiologia* 2(4). doi: 10.3390/physiologia2040015

Oliveira, GC., Broetto, SG., Pereira, OJ., Penha, JS., Lopes, NGM., Silva, DM. (2022) Effects of different levels of metal exposure and precipitation regimes on chlorophyll *a* fluorescence parameters in a coastal Brazilian restinga species. *Journal of Photochemistry and Photobiology* 12. doi: 10.1016/j.jpap.2022.10015.

Peña-Rojas, K., Donoso, S., Badaracco, C., Naulin, PI., Gotor, B., Riquelme, A. (2024) Anatomical Responses of Two Species under Controlled Water Restriction. *Plants*. 13. doi:10.3390/plants13192812.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2022.

Richardson, F., Jordan, GJ., Brodribb, TJ. (2020) Leaf hydraulic conductance is linked to leaf symmetry in bifacial, amphistomatic leaves of sunflower. *J Exp Bot*. 71(9). doi: 10.1093/jxb/eraa035.

Santos, CS., Freitas, AF., Silva, GHB., Carvalho, MAF., Santos, MO., Carvalho, R., Silva, VA. (2022) Adaptations to the drought season and impacts on the yield of 'Híbrido de Timor' coffee tree in the Minas Gerais State Cerrado (Brazilian Savanna). *Pesq. Agropec. Trop*. doi:10.1590/1983-40632022v5272448.

Santos, SK., da Silva Gomes, D., dos Santos, LWO., Soares, VA., Dantas, EFO., Henschel, JM., Batist, DS. (2022) Exogenous Carnitine Mitigates the Deleterious Effects

of Mild-Water Stress on Arugula by Modulating Morphophysiological Responses. *J Plant Growth Regul.* doi:10.1007/s00344-022-10868-y.

Sarker, U., Oba, S. (2018) Catalase, superoxide dismutase and ascorbate-glutathione cycle enzymes confer drought tolerance of *Amaranthus tricolor*. *Rep Sci.* doi:10.1038/s41598-018-34944-0.

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Ramakrishnan, M., Sidhu, G.S., Bali, A.S., Handa, N., Kapoor, D., Yadav, P., Khanna, K. (2019) Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A review. *J. Plant Growth Regul.* doi:10.1007/s00344-019-10018-x.

Sankaran, M. (2019) Droughts and the ecological future of tropical savanna vegetation. *Journal of Ecology.* doi: 10.1111/1365-2745.13195.

Sato, H., Mizoi, J., Shinozaki, K., Yanaguchi-Shinozaki, K. (2024) Complex plant responses to drought and heat stress under climate change. *The Plant Journal.* doi:10.1111/tpj.16612.

Schiassi, MCEV., Souza, VRD., Lago, AMT., Campos, LG., Queiroz, F. (2018) Fruits from the Brazilian Cerrado region: physicochemical characterization, bioactive compounds, antioxidant activities, and sensory evaluation. *Food Chem.* doi:10.1016/j.foodchem.2017.10.104.

Sen, S. (2023) Impact of Seasonal Stress on Reactive Oxygen Species and Scavenging Enzymes of Two Crop Plants Growing Under Tropical Indian Conditions. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, Vol. 19, No. 4 pp. 43-55.

Siddiqui, S.A., Khatri, K., Patel, D., Rathore, MS. (2022) Photosynthetic Gas Exchange and Chlorophyll a Fluorescence in *Salicornia brachiata* (Roxb.) Under Osmotic Stress. *J Plant Growth Regul* 41. Doi:10.1007/s00344-021-10311-8.

Silva, FAM., Assad, ED., Evangelista, BA. (2008) Caracterização climática do Bioma Cerrado. In: Sano, SM., Almeida, SP., Ribeiro, JF (ed). (2008) Cerrado: Ecologia e Flora. Embrapa.

Silva, DV., Cabral, CM., Ferreira, EA., Carvalho, FP., Santos, AB., Dombroski, JL. (2018) Anatomical adaptations to different soil moisture contents in palisade grass and smooth pigweed. *Rev. Ceres.* doi: 10.1590/0034-737X201865040002.

Silva, KO., Sant'Ana, JAV., Silva Júnior, JJ., Castro, YO. (2022) Estimativa de evapotranspiração de referência (ETO) por diferentes fórmulas empíricas no município de Confresa-MT. *Revista PesquisAgro.* doi: 10.33912/pagro.v5i01.1100.

Silva, PS., Libonati, R., Schmidt, IB., Nogueira, J., DaCamara, CC. (2024). Climate Change and Fire: The Case of Cerrado, the Brazilian Savanna. In: Mishra, M., de Lucena, AJ., Maharaj, B. (eds) *Climate Change and Regional Socio-Economic Systems in the Global South*. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-97-3870-0_6.

Simkin, A.J., L. Kapoor, C.G.P. Doss, T.A., Hofmann, TA., Lawson, T., Ramamoorthy, S. (2022) The role of photosynthesis related pigments in light harvesting,

photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynth. Res.*, 152(1). doi:10.1007/s11120-021-00892-6.

Strasser, R.J., Tsimilli-Michael, M., Srivastava, A. (2004) Analysis of the Chlorophyll Fluorescence Transient. In : Papageorgiou, G.C., Govundjee (eds) Chlorophyll a fluorescence. *Advances in Photosynthesis and Respiration*, vol 19. Springer. doi : 10.1007/978-1-4020-3218-9_12.

Strassburg, BBN., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, AE., Oliveira Filho, FJB., de Mattos Scaramuzza, CA., Scarano, FR., Soares-Filho, B., Balmford, A, (2017) Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecol Evol.* doi: 10.1038/s41559-017-0099.

Sun, Z., You Y., Zhu, W., Zhou, Y. (2023) Morphological, Physiological, and Biochemical Composition of Mulberry (*Morus* spp.) under Drought Stress. *Forests* . doi: 10.3390/f14050949.

Teixeira, TM., Boeff, DD., Carvalho, LO., Ritter, MR., Konrath, EL. (2024) The traditional use of native Brazilian plants for male sexual dysfunction: Evidence from ethnomedicinal applications, animal models, and possible mechanisms of action. *Journal of Ethnopharmacology*. doi: 10.1016/j.jep.2023.116876.

Tombesi, S., Frioni, T., Grisafi, F., Sabbatini, P., Poni, S., Palliotti, A. (2021) The Decrease of Leaf Dark Respiration during Water Stress Is Related to Leaf Non-Structural Carbohydrate Pool in *Vitis vinifera* L. *Plants* (Basel). doi: 10.3390/plants11010036.

Umar, M., Siddiqui, ZS. (2020) Florescence assessment of sunflower genotypes against drought stress environment. *Pak.J. Bot.*, 52. doi:10.30848/PJB2020-4(29).

Velazco, SJE., Villalobos, F., Galvão, F., De Marco Junior, P. (2023). Transboundary conservation opportunities for Cerrado's plant species, *Biological Conservation*. doi: 10.1016/j.biocon.2023.110194.

Xu, H., Li, Y., Xu, G., Zout, T. (2008) Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation. *Plant Cell Environ.* doi: 10.1111/j.1365-3040.2006.001626.x.

Zahra, N., Hafeez, MB., Kausar, A., Zeidi, MA., Sidique, LHM., Farooq, M. (2023) Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. *Journal of Agronomy and Crop Science*. doi:10.1111/jac.12652.

Zandalina, SI., Balfagón, D., Gómez-Cadenas, A., Mittler, R. (2022) Plant responses to climate change: metabolic changes under combined abiotic stresses. *Journal of Experimental Botany*. doi:10.1093/jxb/erac073.

Zhang, M., Li, Z., Lu, Z., Qiao, J., Liu, J., Li, C., Zhang, P., Zhao, X., Niu, J., Huang, L. (2021) Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence characteristics and yield of summer maize at silking stage. *Journal of Southern Agriculture*. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2021.04.009.

Zhanassova, K., Kurmanbayeva, A., Gadilgerayeva, B., Yermukhambetova, R., Iksat, N., Amanbaveva, U., Bekturova, A., Tleukulova, Z., Omarov, R., Masalimov, Z. (2021)

ROS status and antioxidant enzyme activities in response to combined temperature and drought stresses in barley. *Acta Physiol Plant.* 43. doi:10.1007/s11738-021-03281-7.

Zimbres, B., Shimbo, J., Bustamante, M., Levick, S., Miranda, S., Roitman, I., Silvério, D., Gomes, L., Fagg, C., Alencar, A. (2020) Savanna vegetation structure in the Brazilian Cerrado allows for the accurate estimation of aboveground biomass using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management.* doi: 10.1016/j.foreco.2019.117798.

Zoulias, N., Brown, J., Rowe, J., Casson, S.A. (2020). HY5 is not integral to light mediated stomatal development in *Arabidopsis*. *Plos One.* doi:10.1371/journal.pone.0222480.

Zufferey, V. (2016) Leaf Respiration in Grapevine (*Vitis Vinifera* 'Chasselas') in Relation to Environmental and Plant Factors. *Vitis J. Grapevine Res.* Doi: 10.5073/vitis.2016.55.65-72.

Zúniga-Feest, A., Bustos-Salazar, A., Alves, F., Martinez, V., Samith-Ramírez, C. (2017). Physiological and morphological responses to permanent and intermitente waterlogging in seedlings of four evergreen trees of temperate swamp forests. *Tree Physiology*, 37. doi: 10.1093/treephys/tpx023.

Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, MS., Naravan, OP. (2021) Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. *Gene Reports.* doi: 10.1016/j.genrep.2021.101040.

Yang, X., Lu, M., Wang, Y., Wang, Y., Liu, Z., Chen, S. (2021) Response Mechanism of Plants to Drought Stress. *Horticulture.* doi: 10.3390/horticulturae7030050.

Yalcinkaya, T., Uzildav, B., Ozgur, R., Turkan, I. (2019) The roles of reactive carbonyl species in induction of antioxidant defence and ROS signalling in extreme halophytic model *Eutrema parvulum* and glycophytic model *Arabidopsis thaliana*. *Environmental and Experimental Botany.* doi: 10.1016/j.envexpbot.2019.01.009.

Yan, Y., Ryu, Y., Dechant, B., Li, B., Kim, J. (2023) Dark respiration explains nocturnal stomatal conductance in rice regardless of drought and nutrient stress. *Plant, Cell & Environment.* doi:10.1111/pce.14710.

Yavas, I., Jamal, MA., Din, KU., Ali, S., Hussain, S., Farooq, M. (2024) Drought-Induced Changes in Leaf Morphology and Anatomy: Overview, Implications and Perspectives. *Pol. J. Environ. Stud.* doi: 0.15244/pjoes/174476.

Yin, O., Tian, T., Kou, M., Liu, P., Wang, L., Hao, Z., Yue, M. (2020) The relationships between photosynthesis and stomatal traits on the Loess Plateau. *Global Ecology and Conservation.* doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01146.

Wang, H., Wang, R., Harrison, SP., Prentice, IC. (2022) Leaf morphological traits as adaptations to multiple climate gradients. *J Ecol.* doi: 10.1111/1365-2745.13873.

Wolf, A., Anderegg, WRL., Pacala, SW. (2016) Optimal stomatal behavior with competition for water and risk of hydraulic impairment. *Biological Sciences*. doi: 10.1073/pnas.16151441.

Wright, AL., West, JB., Lima, ALA., Souza, ES., Medeiros, M., Wilcox, BP. (2023) Contrasting water-use strategies revealed by species-specific transpiration dynamics in the Caatinga dry forest, *Tree Physiology*. doi:10.1093/treephys/tpad137.

4. Capítulo 2

(Normas de acordo com a revista Plant Molecular Biology)

Sazonalidade hídrica modifica o perfil metabólico de *Anemopaegma arvense*, uma espécie nativa do Cerrado

Resumo

O Cerrado é um dos ecossistemas mais ameaçados no mundo, por causa da intensa atividade humana, que tem provocado a degradação e fragmentação. Além disso, a intensificação das mudanças climáticas tem alterado a sazonalidade hídrica em várias regiões deste domínio, intensificando períodos de seca e modificando os padrões de precipitações de chuva. Essas alterações causam modificações no metabolismo das plantas, que precisam ajustar os processos fisiológicos na tentativa de passar pelos períodos de estresse. Este estudo teve como objetivo investigar as principais mudanças nos padrões de metabólitos de plantas silvestres de *Anemopaegma arvense* em um fragmento de Cerrado. A pesquisa foi realizada em Porto Alegre do Norte, nordeste do estado de Mato Grosso e as coletas foram realizadas em três épocas, sendo seca (início e final – S_I e S_F) correspondendo aos meses de maio e setembro de 2021 e chuvosa (C), em janeiro de 2022. Durante os períodos secos (S_I e S_F) houve maior acúmulo de compostos osmoprotetores, como aminoácidos, ácidos orgânicos, o hormônio ácido abscísico e sacarose, que atuam na proteção contra desidratação e estão relacionados aos mecanismos de tolerância à seca. Além disso, foram identificados compostos de interesse medicinal, com aplicações promissoras na produção de bioprodutos para os setores alimentício, cosméticos, farmacêutico e fungicidas. Assim, os resultados indicam que a *Anemopaegma arvense* é uma planta tolerante as mudanças na sazonalidade hídrica, alterando seu perfil metabólico para atravessar o período de seca e sugerem o acúmulo de metabólitos com função reparadora para recuperação de membranas danificadas durante o período chuvoso. Essas respostas demonstram ajustes em mecanismos de adaptação que permitem a tolerância e a sobrevivência da espécie nesse cenário de intensificação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: metabolismo vegetal; resistência a seca; compostos metabólicos.

4.2 Introdução

O Cerrado é a savana mais biodiversa do mundo, com alto nível de endemismo, mas é também a mais ameaçada (Del Claro e Silingard, 2019; Sano et al. 2019). Estima-se que entre 60 e 80% da flora endêmica do Cerrado esteja em risco de extinção (Pompeu, 2020), sobretudo pelas perdas de habitat natural pela combinação de baixa proteção legal, uso irregular das terras e o avanço das mudanças climáticas (Pacheco et al. 2024; Costa-Coutinho et al. 2022). O aumento das ondas de calor, redução no período e quantidade de

chuvas colocam em risco a sobrevivência de muitas espécies a estabilidade socioeconômica (Boonman et al. 2022; Braga e Laurini, 2024). Stríks et al. (2024), aponta para um risco aumentado de seca futura nos biomas de savana que aumentarão o déficit hídrico, uma vez que o Cerrado está atravessando um período de aridez sem precedentes nos últimos 720 anos. Estima-se que a mudança mais marcante no equilíbrio hidrológico do Cerrado tenha início a partir da década de 1970, no entanto, entre os anos de 1960 e 2021 foi registrado redução anual de 64,8 mm na precipitação e de 5,2 dias no número de dias chuvosos (Hofmann et al. 2023; Stríks et al. 2024).

O Cerrado caracteriza-se pela sazonalidade hídrica com duas estações bem definidas, sendo uma estação chuvosa (outubro a março), e uma estação seca (maio a setembro), durante a qual os índices pluviométricos mensais reduzem bastante, (Bustamante et al. 2012). Como a sazonalidade influencia no desempenho, fenologia e biossíntese de compostos secundários tem sido objeto de pesquisas principalmente para produção de compostos de interesse medicinal (Chuine e Regniere, 2017). Como exemplo, estudos com *Copaifera langsdorfii*, *Xylopia emarginata*, *Duguetia furfuracea* (Franco et al. 2016; Medeiros et al. 2021; Macedo et al. 2021) identificaram maior produção de metabólitos secundários de uso medicinal durante os períodos de seca. No entanto, são incipientes os estudos que relatam como as estações chuvosa e seca do Cerrado brasileiro, impactam o metabolismo das plantas no acúmulo de metabólitos de proteção ou defesa contra os danos causados pela flutuação hídrica (Macedo et al. 2021).

A sazonalidade hídrica e os eventos de seca podem induzir diversas mudanças metabólicas nas plantas, sendo um dos principais fatores que influencia a aclimação e/ou adaptação ao ambiente (Sampaio et al. 2016; Zhou et al. 2022; Luo et al. 2023). A intensidade e duração do tempo de seca podem resultar em danos significativos e, conseqüentemente, a morte das células vegetais pela geração de excesso de espécies reativas de oxigênio (EROs), que causam peroxidação lipídica, degradação de proteínas e ácidos nucleicos (El-Betage et al. 2020; Prestes et al. 2024). Apesar disso, no entanto, as plantas apresentam mecanismos de resposta para responder a essas alterações, como o fechamento estomático mediado por ácido abscísico e o ajuste osmótico, que ocorre pelo acúmulo de compostos osmoprotetores, incluindo açúcares, açúcares-álcoois e aminoácidos (Dumschott et al. 2019; Vital et al. 2022).

Vários aminoácidos desempenham papel fundamental como precursores na síntese de metabólitos secundários, moléculas sinalizadoras, e na síntese de proteínas, o que prepara a planta para a recuperação rápida do metabolismo após o estresse (Hildebrandt,

2018; Batista-Silva et al. 2019). A serina é um dos aminoácidos com função osmoprotetora que podem aumentar a concentração durante episódios de seca em plantas de amendoim, trigo, alfafa e ervilha (Mouradi et al., 2016, Guo et al. 2018; Patel et al. 2021). Resultados semelhantes foram encontrados para fenilalanina para plantas nativas como a *Gomphrena agrestis* (para-tudo do campo), *Paubrasilia echinata* (pau-pernambuco) e *Licania tomentosa* (oiti mirim) (Melo et al. 2021; Rodríguez-Páez. 2024).

Embora estudos sobre as respostas metabólicas a estresses abióticos sejam mais comuns em frutíferas e poucas nativas de interesse comercial (Kang et al. 2020; Wang et al. 2020; Alves et al. 2021; Tamang et al. 2021; Zandalinas et al. 2022), a maioria desses estudos são realizados em ambientes controlados (Zandalinas et al. 2022; Shen et al. 2022; Lahuta et al. 2022) e não refletem as condições reais do campo, em que as plantas enfrentam variações ambientais extremas e ciclos repetidos de seca e chuva. A *Anemopaegma arvense* é uma planta nativa do Cerrado com múltiplos potenciais medicinais cosméticos e biocidas (Teixeira et al. 2024) e ameaçada de extinção (Brasil, 2022). Compreender o comportamento e as variações dessa espécie nativa diante as condições sazonais tornam-se importante para entender as estratégias que a planta utiliza para sobreviver e permanecer no ambiente. Dessa forma, foram testadas as seguintes hipóteses: 1) – A variação sazonal da disponibilidade hídrica induz alterações nos padrões de metabólitos em *A. arvense*; 2) – Durante a estação seca, o acúmulo de compostos osmoprotetores ocorre como mecanismo de proteção e sobrevivência ao estresse hídrico; e 3) – A estação chuvosa evidencia acúmulo de diferentes metabólitos com função reparadora e/ou de preparo da planta para o próximo ciclo de seca.

4.2. Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo, material vegetal e desenho experimental

As plantas de *Anemopaegma arvense* avaliadas neste estudo, estão localizadas em um fragmento de Cerrado localizado em área rural do município de Porto Alegre do Norte situado no nordeste de Mato Grosso, na região conhecida como médio norte Araguaia. A área está localizada a cerca de 6 km do município (10° 53' 188" S e 51° 37' 273' WO), com altitude de aproximadamente 206 m (Fig. 1). O clima da região é caracterizado por duas estações bem definidas, o inverno e o verão. A estação chuvosa inicia-se entre os meses de setembro e outubro e estende-se até março e abril, destacando-se os meses de novembro, dezembro e janeiro como os que, geralmente,

apresentam a maior média mensal de precipitação (Silva et al. 2008; Zimbres et al. 2020). A precipitação anual atinge cerca de 1900 mm e a temperatura média é de 28°C, com máxima de 41°C e a mínima de 15°C (Silva et al. 2022). A estação seca é marcada por profunda deficiência hídrica, causada pela redução drástica da ocorrência de chuvas e inicia-se entre os meses de abril e maio e estende-se até parte dos meses de setembro a outubro, registrando, dessa maneira, de 5 a 6 meses de deficiência hídrica climática (Silva et al. 2008).

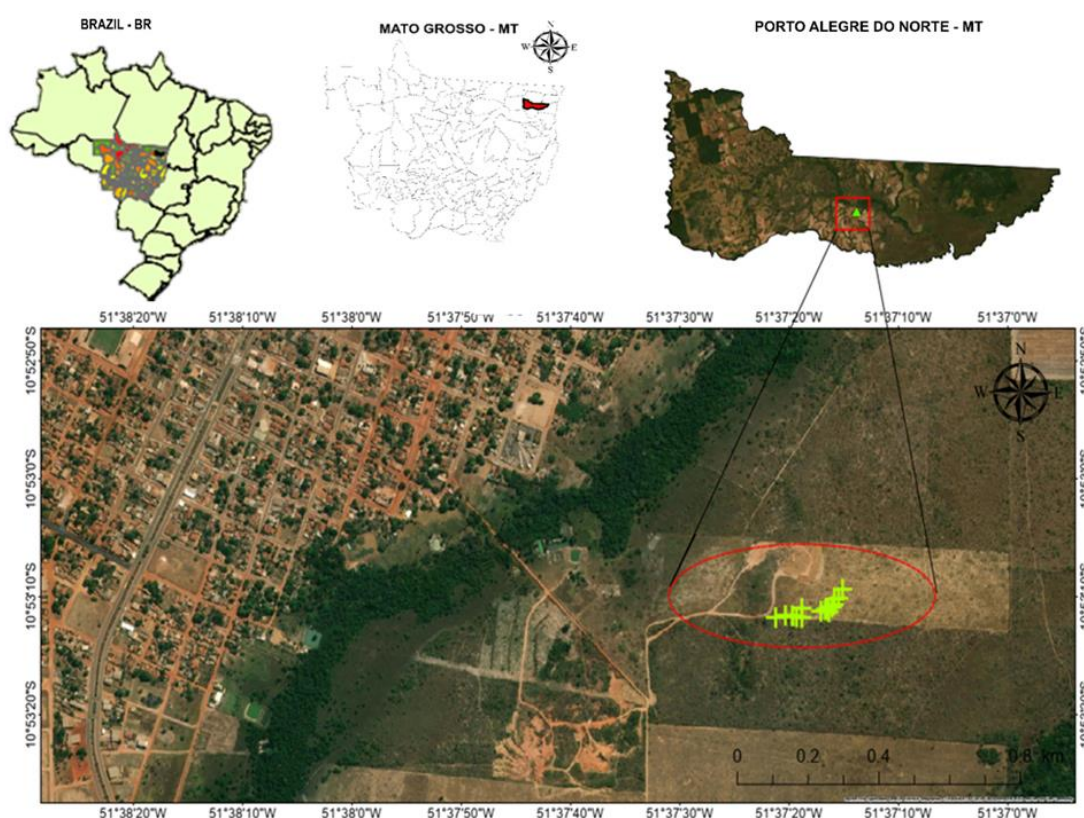


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Porto Alegre do Norte, Mato Grosso, Brasil. Os pontos em amarelo indicam a localização das plantas amostradas.

As avaliações e coletas de material vegetal, foram realizadas em maio de 2021, agosto de 2021 e janeiro de 2022. Com base na precipitação durante os meses anteriores às datas de amostragem evidenciados pelos dados climatológicos coletados da estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso-Campus Confresa (a aproximadamente 20 km do local da coleta das amostras em linha reta), foram definidas três condições pluviométricas: durante o período de abril até agosto de 2021 (Período Seco) e setembro de 2021 até março de 2022 (Período Chuvoso). Considerou-se que as plantas amostradas no mês de

maio de 2021 foram avaliadas no início do período de seca (S_I), em agosto de 2021 no fim da seca (S_F) e em janeiro de 2022 no período chuvoso (C) (Fig. 2).

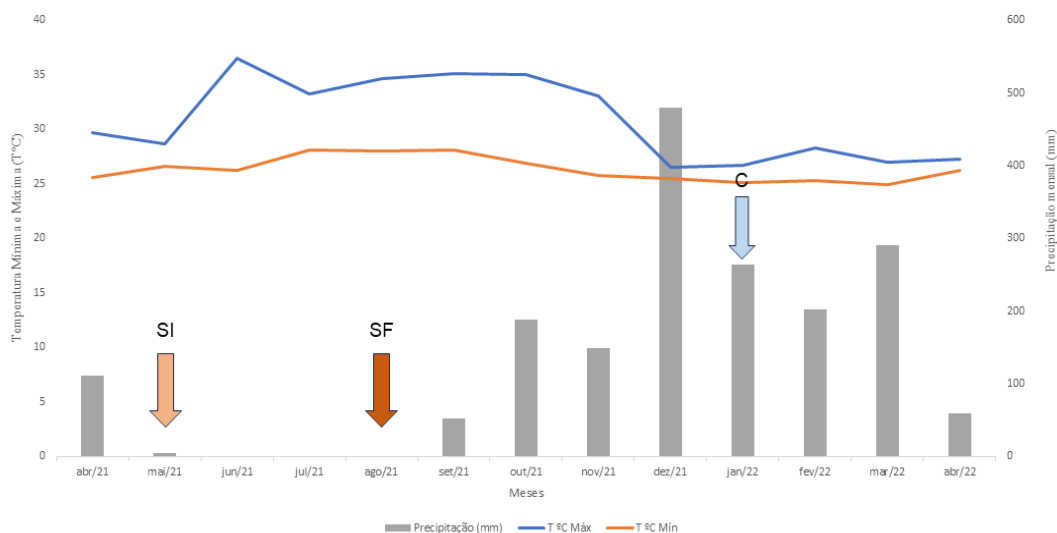


Figura 2: Temperatura máxima e mínima (°C) e precipitação (mm) entre os meses de abril de 2021 a janeiro de 2022, em Porto Alegre do Norte-MT. Em destaque os meses que foram realizadas as observações. Fonte: Estação meteorológica do IFMT, Campus Confresa-MT. (2022)

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com três épocas e 15 repetições (15 espécimes) de plantas silvestres de *Anemopaegma arvense*. As plantas foram selecionadas com base na presença de mais de três ramos. A coleta do material vegetal para análises metabólicas foi realizada no terço médio do ápice para a base de cada planta. Folhas de *A. arvense* foram colhidas e acondicionadas em nitrogênio líquido e transportadas até o laboratório e foram maceradas e posteriormente liofilizadas.

4.2.2 – Extração dos metabólitos

Os metabólitos foram extraídos a partir do material triturado em nitrogênio líquido. Visando identificar o maior número de metabólitos pertencentes a diferentes classes químicas, foram usados os solventes de extração: Metanol:Clorofórmio:Água (3:1:1). Os compostos isotopicamente marcados: ácido succínico (D4, 98% - DLM 584-5), ácido mirístico (1,2,3- $^{13}C_3$, 99% - CLM 3665-0.5) e ácido palmítico (1,2,3,4- $^{13}C_4$), preparados na concentração de 1 mg mL⁻¹, foram utilizados como padrões internos. Foram usados 100 mg de material biológico para a extração.

Inicialmente, foi adicionada uma esfera magnética de tungstênio no tubo contendo o material já triturado. O tubo foi imediatamente submetido a agitação em equipamento Vibration Mill (Retsch) por 30 segundos, 20 Hz. Em seguida foram adicionados 500 μL de solvente gelado e os tubos foram novamente agitados, por 45 segundos, 20 Hz. Os tubos foram sonicados por 15 minutos, 4 °C e na sequência as esferas foram removidas. Posteriormente as amostras foram centrifugadas por 10 minutos a 4°C, 16000 x g. O sobrenadante foi filtrado (filtro Millex 0,22 μm e 500 μL , Millipore, Brasil) e armazenado a -80°C até o momento da análise.

4.2.3 – Derivatização dos metabólitos

Para análise por GC-MS, alíquota de 100 μL da amostra de metabólitos foi transferida para vials de vidro (1.5 mL) e liofilizada. Na etapa seguinte, a amostra foi derivatizada. Para a derivatização foram adicionados 30 μL de metoxiamina (15 mg mL⁻¹) em piridina, agitadas por 1 min e em seguida mantidas em repouso por 16 h à temperatura ambiente no escuro. A sililação foi realizada com a adição de 30 μL de MSTFA (N-metil-trimetilsilil-trifluoroacetamida) com 1% de TMCS (trimetilclorosilano). As amostras foram mantidas em repouso por 1 h, também no escuro. Posteriormente, foram adicionados 30 μL de Heptano. Nesta etapa, foram utilizadas uma série de alcanos (C12 – C40) que possibilitou o cálculo dos índices de retenção.

4.2.4 – Análise por GC-MS e processamento dos dados

As amostras derivatizadas foram automaticamente injetadas (1 μL) no modo *splitless* em cromatógrafo gasoso (8890GC *Agilent Technologie*), equipado com uma coluna de sílica fundida de 20 m comprimento x 0,18 mm diâmetro interno x 0,18 μm de filme (*Agilent J&W Scientific*). A temperatura de injeção foi 280 °C, com fluxo de 20 mL min⁻¹, iniciado após 300 s da aquisição dos dados, sendo que a temperatura inicial, da primeira coluna, foi de 80 °C, mantida por 2 minutos e aumentada 15 °C /minutos até atingir 305 °C, então essa temperatura foi mantida por 2 minutos. O efluente da coluna foi introduzido na fonte de íons do equipamento GC-TOFMS (Pegasus BT, Leco, St. Joseph). A temperatura da fonte de íons foi 250 °C, feixe de elétrons 70-eV, corrente de ionização de 2.0 mA e 20 espectros s⁻¹ sendo registrados na faixa de 45-800 *m/z*, a voltagem do detector foi 1500 V.

O processamento dos dados de GC-MS foi realizado no programa *ChromaTOF for BT*, versão 1.2.0.6, no qual foi realizada correção da linha de base, deconvolução, obtenção do índice de retenção (RI), correção do tempo de retenção (RT), identificação e alinhamento de picos e identificação dos metabólitos com o auxílio da biblioteca da NIST, versão 2.4 (ano 2020). Foram considerados metabólitos válidos apenas aqueles com três ou mais massas características e com *score* igual ou maior a 800.

4.2.5 – Análise Estatística dos dados

A análise de variância foi realizada através da função *aov*, considerando o fator “época” como efeito de tratamento perante o comportamento das variáveis relacionadas aos metabólitos de *A. arvense*. As médias estimadas pela função *emmeans* do pacote *Emmeans* (Lenth R 2022), e quando o efeito dos tratamentos foi significativo, submetido ao teste de comparação de médias Tukey. Também foi realizada análise multivariada utilizando PCA (Análise dos Componentes Principais) utilizando os pacotes *FactoMineR* (Le; Josse e Husson 2008) e *factoextra* (Kassambara e Mundt, 2020).

4.4 Resultados

4.3.1 Perfil metabólico de *Anemopaegma arvense* em resposta às variações sazonais na precipitação

Foram identificados 35 compostos, incluindo ácidos orgânicos, aminoácidos, açúcares, compostos fenólicos, polióis, terpenos e outros metabólitos importantes para o equilíbrio e resistência da planta frente às variações ambientais sazonais. Para destacar os metabólitos mais influentes durante essas variações, foram realizadas análises de componentes principais (PCA) e heatmap (Fig.3). De acordo o *heatmap*, foi observado maior influência de metabólitos relacionados a marcadores de condições de estresse hídrico como ácido málico, serina, fenilalanina, ácido aspártico, ácido abscísico, ácido glutâmico e sacarose no final da seca (S_F) e redução do ácido galactárico, sorbitol, ácido piroglutâmico, galactinol, tocoferol, ácido oleanólico, maltose, gluconolactone. Enquanto, que no início da seca (S_I), a contribuição para a dimensão 1 foi dominada pelos compostos como celobiose, prolina, valina, treonina, N-Methyl-Prolina, quercetina, ácido glutâmico que apresentaram aumento.

Durante a estação chuvosa, moranolina, galactinol, sorbitol, ácido glicérico destacaram-se com maior acúmulo e alta correlação com essa época.

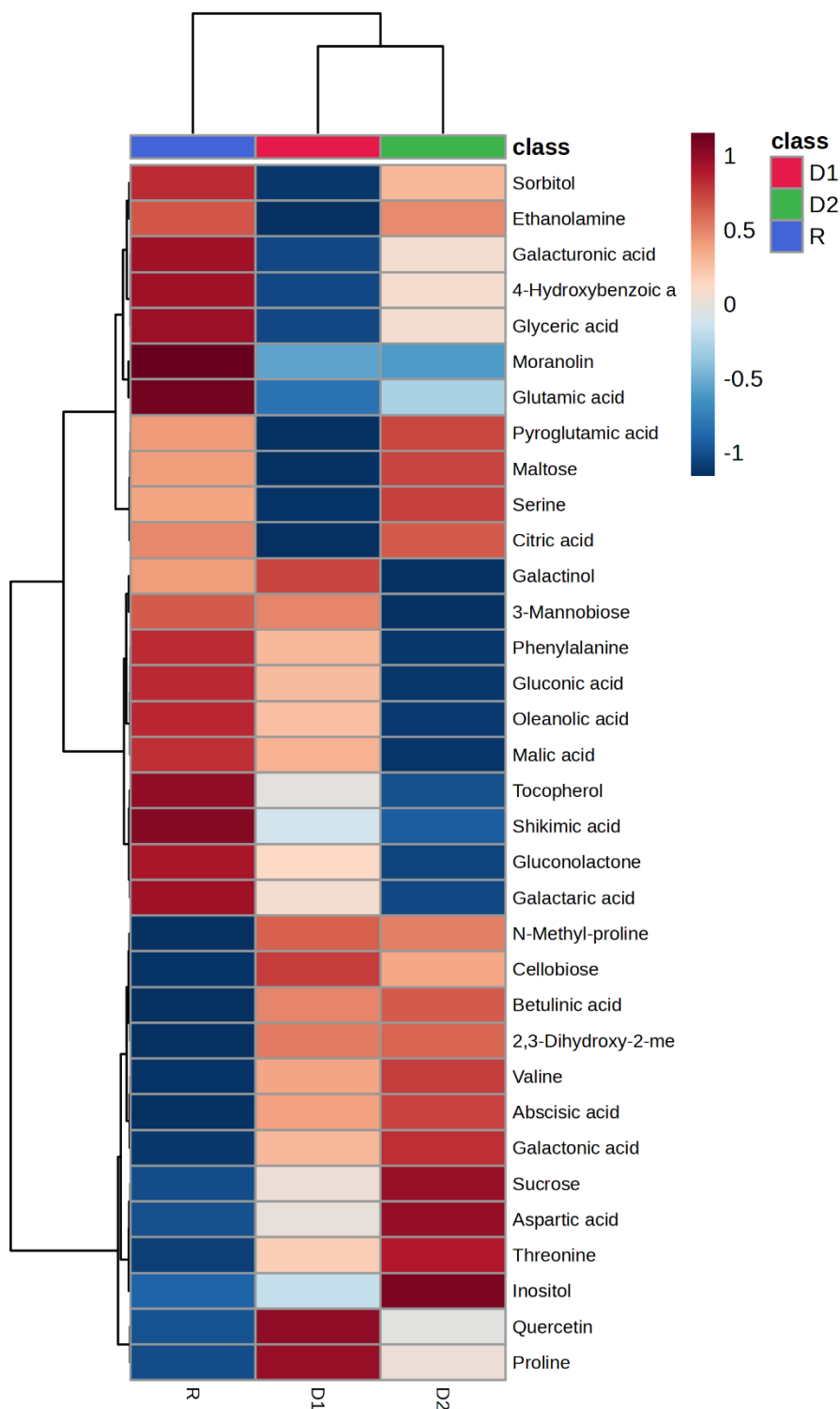


Figura 3: Metabólitos abundantes em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Os valores da abundância diferencial dos metabólitos são representados pelo gradiente de coloração. As cores em vermelho escuro indicam alta concentração, vermelho claro e azul claro média concentração e azul escuro baixa concentração do metabólito para cada época estudada.

4.3.2 Análise quantitativa dos metabólitos significativos nas variações sazonais em *A. arvense*

Dos metabólitos analisados, foram investigados quais são mais influenciados pelas variações sazonais no ambiente. Entre eles, os ácidos orgânicos, ácido galactárico e o ácido glicérico, destacaram-se principalmente sob estação chuvosa (C) (Fig. 3 A-B), sendo, que o ácido galactárico também apresentou aumento no início da seca (S_I), enquanto ambos demonstraram concentrações baixas no final da seca (S_F).

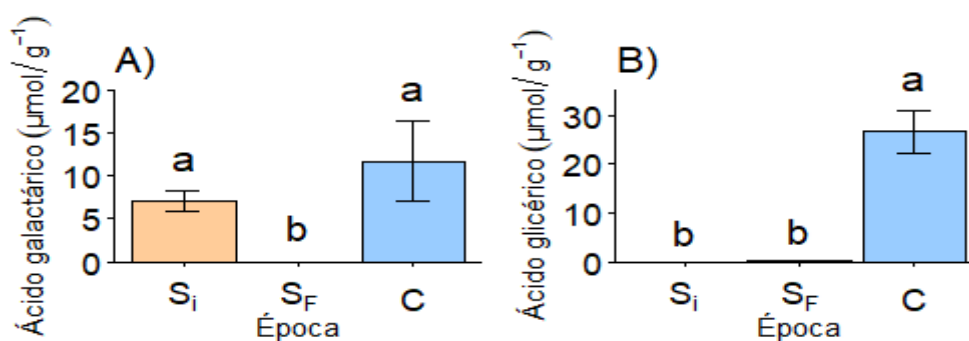


Figura 4: Concentração de ácidos orgânicos: Ácido galactárico (5-A) e Ácido Glicérico (5-B) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

Dentre os aminoácidos, observou-se incrementos na concentração do ácido aspártico, serina e a fenilalanina no final da seca (S_F), período caracterizado por condições mais intensas de déficit hídrico, enquanto os níveis foram similares entre S_I e C (Fig. 6-A). A prolina, importante osmoprotetor, foi mais abundante nas folhas de *A. arvense* no início da seca (S_I), sem alterações na S_F e C (Fig. 6-B).

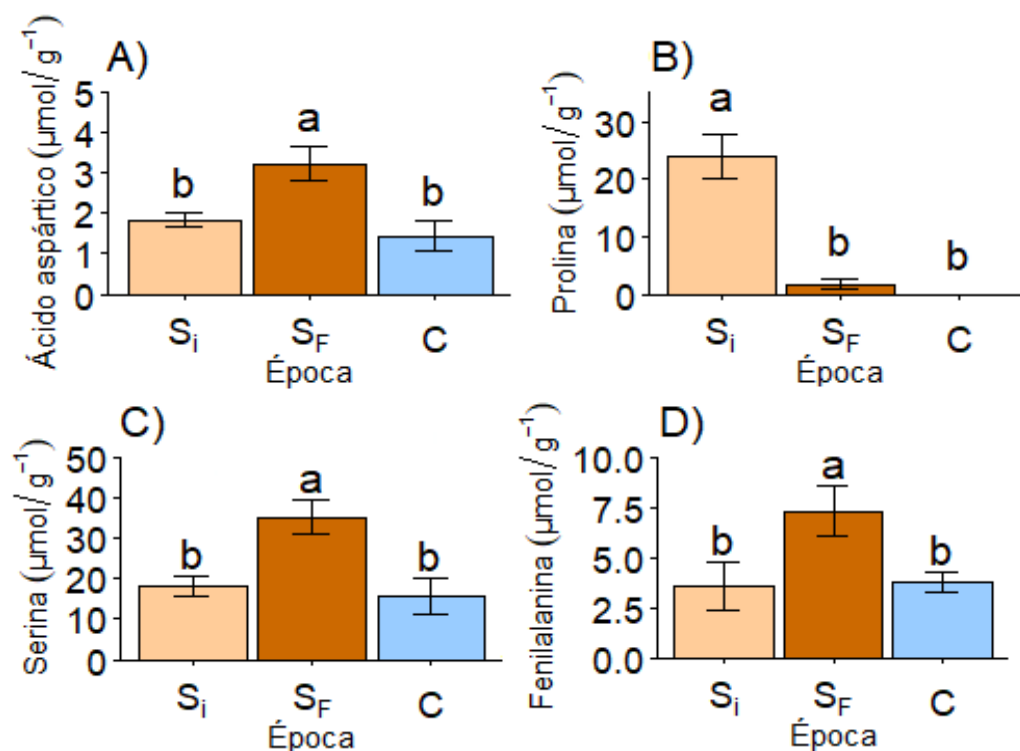


Figura 5: Presença de aminoácidos Ácido Aspártico (6-A), Prolina (6-B), Serina (6-C) e Fenilalanina (6-D) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

O ácido chiquímico, por sua vez, foi encontrado em níveis mais elevados no início da restrição hídrica (S_I), (Fig. 7-A), enquanto para o tocoferol ocorreu queda na concentração durante a estação seca (S_I e S_F) (Fig. 7-B).

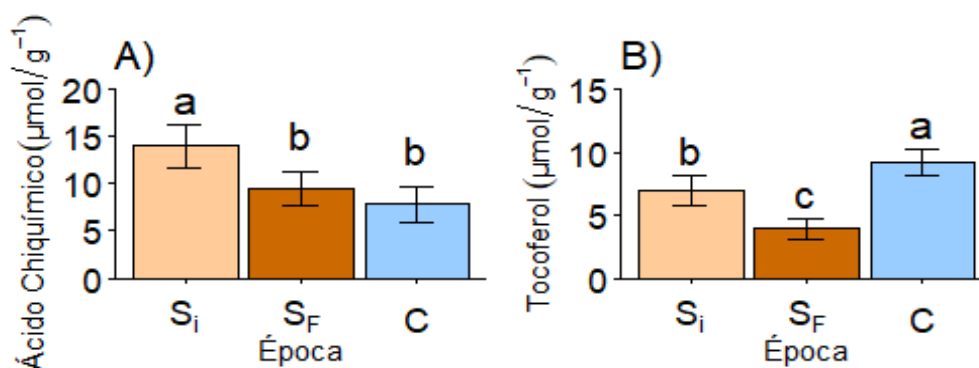


Figura 6: Acúmulo de ácido chiquímico (7-A) e tocoferol (7-B) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

Os metabolitos etanolamina (Fig. 8-A), ácido galacturônico (Fig. 8-B), gluconolactona (Fig. 8-C) e moranolina (Fig. 8-E) tiveram o conteúdo aumentado na estação chuvosa (C). Galactinol (Fig. 8 D) e o ácido piroglutâmico (Fig. 8-F) foram mais

abundantes no início de seca e durante a estação chuvosa. O N-Metil-prolina, o qual também é um marcador de estresse ambiental, aumentou durante a estação seca (S_I e S_F) (Fig. 8-G).

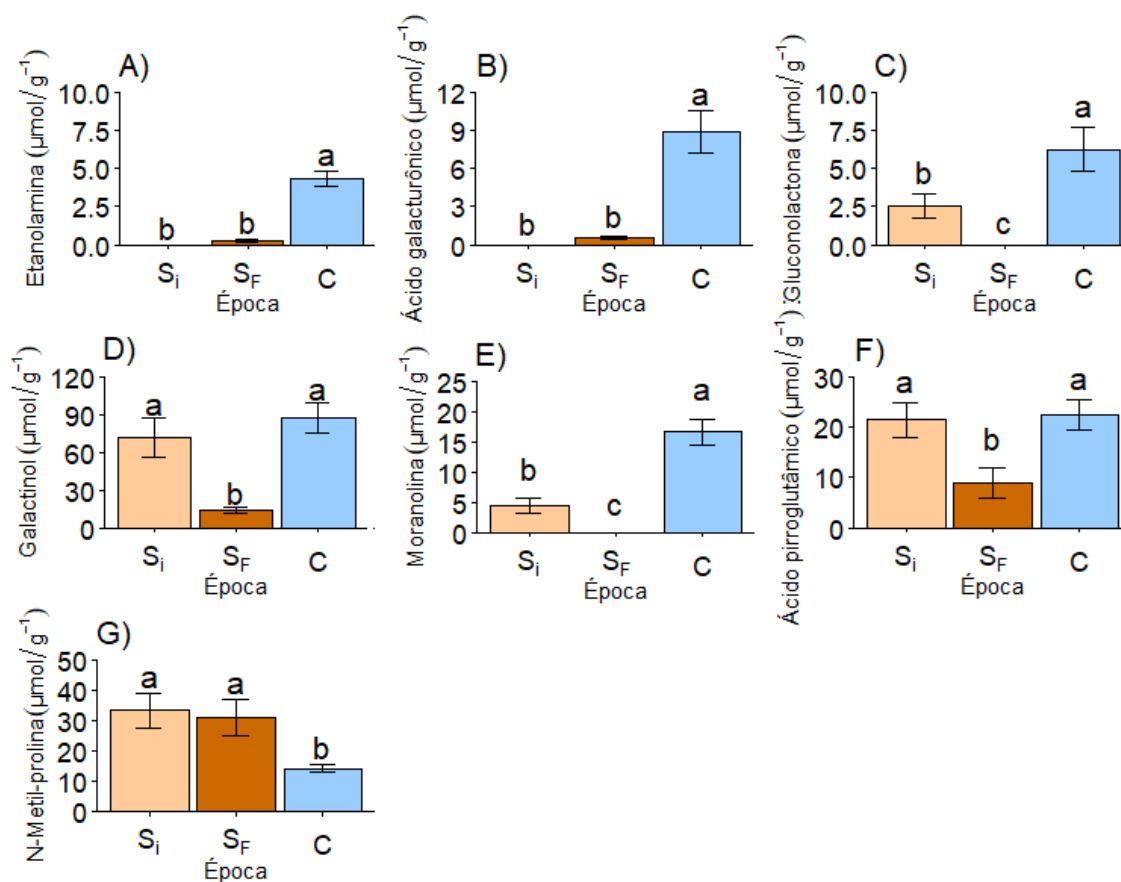


Figura 7: Concentração de etanolamina (8-A), ácido galacturônico (8-B), galactinol (8-C), gluconolactona (8-D), moranolina 8-E), ácido piroglutâmico (8-F) e N-Metil-Prolina (8-G) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O composto orgânico ácido 2,3-di-hidroxi-2-metilbutanoico permaneceu maior no período seco (S_I e S_F), reduzindo durante a estação chuvosa (Fig.9-A). Como esperado em resposta ao déficit hídrico, a concentração de ácido abscísico (ABA) aumentou substancialmente à medida que a seca progrediu no Cerrado, sendo os maiores valores observados em S_F , e reduziu na estação chuvosa (C) (Fig. 9-B). Comportamento similar foi observado para o ácido betulínico (Fig. 9-C). Por outro lado, o ácido 4-hidroxibenzoico manteve-se baixo no período seco (S_I e S_F), aumentando com o início das chuvas (Fig. 9-D).

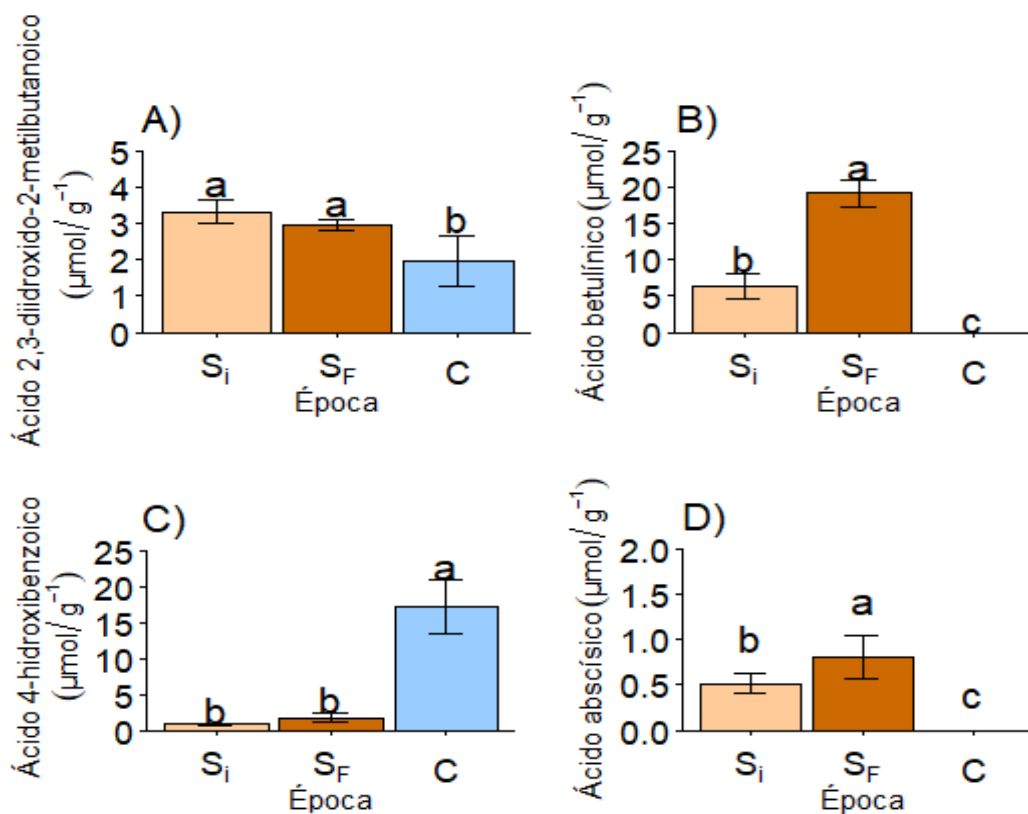


Figura 8: Teor de ácido 2,3-di-hidroxi-2-metilbutanoico (9-A), ácido betulínico (9-B), ácido 4-hidroxibenzoico (9-C) e ácido Abscísico (9-D) em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_I), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

Foram observadas alterações nos níveis de açúcares de *A. arvense*. No início da seca (S_I), menores concentrações de manobiose foram observadas, mas com conteúdo aumentado S_F e mantendo-se semelhante na estação chuvosa (C) (Fig. 10-A). Ao contrário da celobiose e maltose, que tiveram maior acúmulo durante o início da seca (S_I) com redução em S_F e C (Fig. 10-B). Maiores valores de sacarose foram observados no período mais seco (S_F), seguido por redução na estação chuvosa, destacando-o como principal açúcar identificado durante o período de estresse. Concentrações menores de sorbitol foram observadas durante a estação seca (S_I e S_F) com aumento na estação chuvosa (Fig. 10-C).

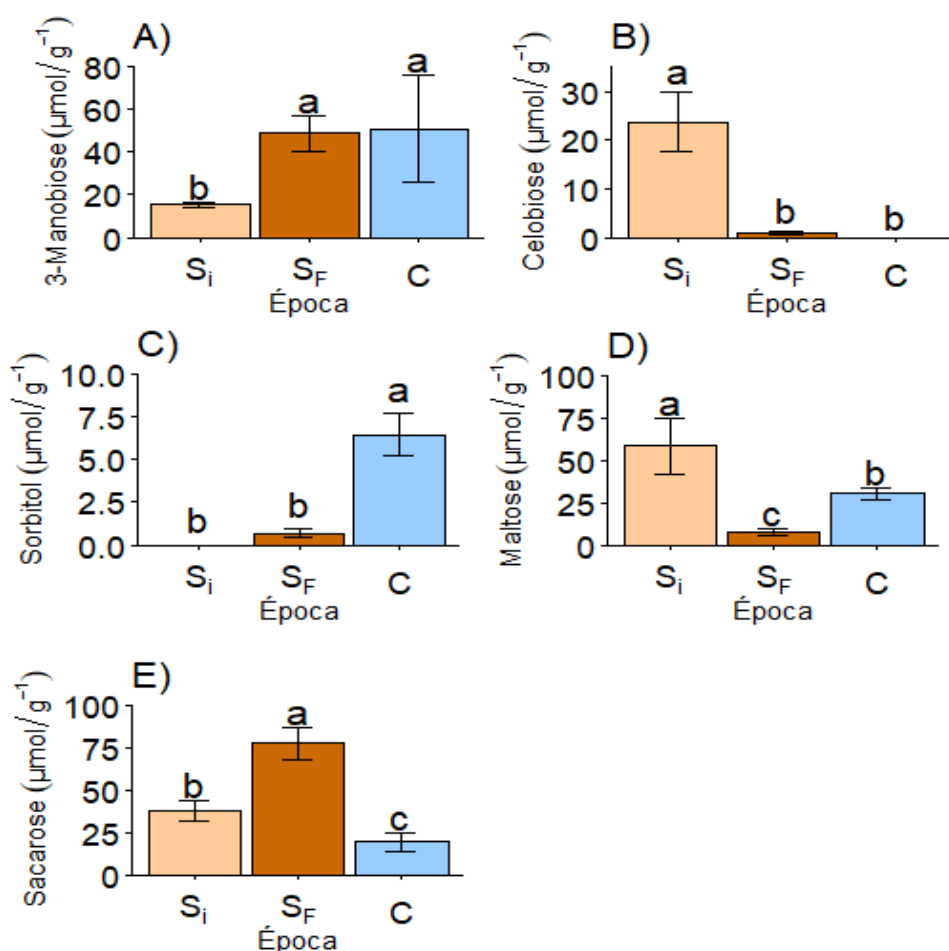


Figura 9: Concentração de açúcares: 3-Manobiose (10-A), celobiose (10-B), sorbitol (10-C), maltose (10-D) e sacarose (10-E), em plantas de catuaba (*Anemopaegma arvense*) sob variação sazonal de precipitação: início da seca (S_i), fim da seca (S_F) e estação chuvosa (C). Médias seguidas da mesma letra não diferiram entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05\%$).

4.4. Discussão

O avanço da seca no Cerrado tem imposto limiares cada vez mais extremos de sobrevivência, e pode culminar com perdas na biodiversidade vegetal (Stríkis et al., 2024). Nesse contexto, identificar os mecanismos que contribuem para a sobrevivência de espécies do Cerrado é essencial para entender vulnerabilidade que as mudanças climáticas podem impor nos habitats naturais, sobretudo para espécies que já se encontram em risco de extinção. Neste estudo, foram investigados os efeitos da sazonalidade hídrica no metabolismo de *Anemopaegma arvense*. O *heatmap* revelou que o perfil metabólico de *A. arvense* é amplamente variável de acordo com a estação seca, sendo essas alterações observadas mesmo quando se considera o início da seca (S_i) e a progressão (S_F). Essas adaptações metabólicas que permitiram às plantas lidarem com

as variações sazonais no Cerrado, um bioma caracterizado por forte estresse hídrico. Durante o período seco (S_I e S_F), foi observado aumento nos níveis de diversos metabólitos, e pode indicar um ajuste da planta para aumentar a resistência a condições de seca e promover a preservação da integridade celular e das funções vitais. Esses ajustes incluem a regulação osmótica, proteção antioxidante, estabilização de proteínas e membranas, processos essenciais para a sobrevivência em ambientes de estresse (Yang et al. 2017; Wang et al. 2019).

Na estação seca, os períodos S_I e S_F foram marcados pelo aumento de metabólitos ormooprotetores. No início da estação seca (S_I) os metabólitos que mais se destacaram foram celobiose, prolina, valina, treonina, N-Metil-Prolina, quercetina, ácido glutâmico, ácido chiquímico (Fig. 3). Estudos com tomilho e feijão caupi sugerem que em situações de déficit hídrico, aminoácidos como a valina e treonina têm importância fundamental no ajuste osmótico e no aumento da tolerância da planta, e podem atuar como forma de preparação para o estresse que pode ocorrer com a intensificação da seca (Ashrafi et al. 2018; Gomes et al. 2020). Curiosamente, a variação nos níveis de prolina, que geralmente é considerada um biomarcador do déficit hídrico, foi inversamente correlacionada ao esperado, com aumento inicial na fase seca S_I e seguido de redução no S_F (Fig.6-B). Esse padrão pode estar associado ao equilíbrio dinâmico entre biossíntese e degradação da prolina nas células. Em condições normais, o acúmulo de prolina ativa a via de degradação por meio de um mecanismo de *feedback*, atuando como osmólito protetor (Spormann et al. 2023). Em algumas espécies, porém, a redução de prolina pode ser provocada pelo transporte da fonte (folhas), para as raízes e a oxidação fornece energia para apoiar o crescimento ou manter a planta durante o estresse hídrico (Zheng et al. 2021; Wang et al. 2022).

Antioxidantes como o ácido chiquímico, precursor de muitos compostos fenólicos vegetais, e o tocoferol, são importantes na eliminação de EROs, proteção de pigmentos e proteínas do aparato fotossintético e na preservação dos lipídios da membrana dos tilacoides contra a degradação oxidativa (Gharibi et al. 2016; Zandi e Schunug 2022; Mishra et al. 2023). Em *A. arvense*, o aumento desses metabólitos no início da seca, seguido de redução no auge da estação (Fig. 7A-B), pode estar associado a resposta protetora inicial, para mobilização de recursos antioxidantes para eliminação de EROs e impedir a peroxidação lipídica, mas com a pressão da seca, a capacidade de síntese desses compostos é superada pela demanda por outros recursos energéticos (Munné-Bosh, 2005). Esse padrão de acúmulo seguido de redução está relacionado ao

efeito de exaustão dos mecanismos antioxidantes devido ao estresse contínuo (El Beltage et al. 2022).

No final da seca (S_F) foi observado maior correlação com aminoácidos (fenilamina, ácido aspártico, serina), ácido abscísico, sacarose e metabólitos secundários. O ácido aspártico ou aspartato é um aminoácido importante para a biossíntese de muitos metabólitos e biomarcador responsivo à seca. Seu acúmulo está relacionado ao desempenho e tolerância das plantas à seca como fonte alternativa de substratos respiratórios, fornecendo fontes alternativas de carbono para as plantas durante períodos de seca sazonais (Pires et al. 2016; Han et al. 2021; Zivanovic et al. 2020). Já serina, além de ser uma osmoprotetora, melhorando a resistência da planta à seca (Vieira et al. 2017), contribui para a manutenção do metabolismo fotossintético, minimizando os efeitos da fotorrespiração e protegendo os complexos fotossintéticos do FSII contra danos (Yadav et al., 2019; Winaya et al. 2020). Por outro lado, a fenilalanina, que é um aminoácido chave no ajuste osmótico, pode contribuir para manutenção do turgor celular, e eliminação de radicais livres de oxigênio (Rangani et al. 2020; Zhao et al. 2021). O acúmulo de fenilalanina também foi observado em variedades de plantas tolerantes e em adaptação à seca como soja, azevém e alcachofra (Wang et al. 2019; Jia et al. 2016; Pan et al. 2018). O alto nível encontrado em *A. arvense* sugere que este aminoácido é importante para a adaptação da espécie as condições de seca. De forma geral, as alterações observadas na concentração de aminoácidos indicam possíveis respostas metabólicas para retardar a desidratação extrema via ajuste osmótico (Vieira et al. 2021) que a *A. arvense* realiza para manter o equilíbrio metabólico mediante as condições de seca sazonal.

Acúmulo de metabólitos secundários de importância econômica como o ácido 2,3-dihidroxi-2metilbutanoico, ácido betulínico e ácido 4-hidroxibenzoico (Fig. 7) também foi observado durante a seca (S_F). Esses metabólitos possuem propriedades bioativas, como atividade anti-inflamatórias (Presini et al. 2021; Mangnier et al. 2024) e são utilizados na produção de bioprodutos de valor agregado com potenciais aplicações biotecnológicas em alimentos, cosméticos, farmácia, fungicidas (Wang et al. 2018; Ritonga et al. 2021; Lin et al. 2022). A identificação da época de maior produção desses compostos pode ser uma informação importante para otimização do cultivo de *A. arvense* para a produção de compostos de valor agregado. A produção desses compostos também são mecanismos de resposta da planta a seca. Estudos associam aumento na concentração de ácido 4-hidroxibenzoico e ácido betulínico como antioxidantes que podem mediar a

eliminação de espécies reativas de oxigênio (ROS) em plantas de milho, pepino e *Hypericum brasiliense* (popularmente conhecida como orelha-de-gato) em condições de déficit hídrico (Abreu e Massafra 2005; Li et al. 2018; Samec et al. 2021). Martins et al. (2019) relata que o ácido 2,3-dihidroxi-2metilbutanoico também atua na planta como importante agente de defesa contra patógenos (estresse biótico).

Mudanças nos níveis do fitohormônio ABA foram observados durante a estação seca (S_I e S_F). A seca induz o acúmulo do ABA, ativando a via de sinalização, que promove o fechamento estomático como primeira resposta ao estresse hídrico (Chen et al. 2020). Dessa forma, o acúmulo de ABA não só auxilia no controle do estado hídrico das folhas e na ativação de enzimas antioxidantes, mas também desencadeia respostas adaptativas complexas que são essenciais para a manutenção do funcionamento da planta sob estresse hídrico (Parkash e Singh 2020; Wang et al. 2021; Tavares et al. 2023). Com a chegada da estação chuvosa, no entanto, houve redução na concentração do ABA. Essa degradação pode estar relacionada com a recuperação do processo fotossintético (Negin e Moshelion 2016). No entanto, só é possível avaliar essa recuperação através da avaliação de trocas gasosas (que não foi realizada neste trabalho), pois o controle de abertura e fechamento estomático também é influenciado por outros metabólitos, como por exemplo o etileno (Hasan et al, 2024).

Ainda no final da seca, percebe-se acúmulo de sacarose e manobiose, semelhante aos resultados encontrados por Motyleva et al (2022) e Liao et al. (2024). Em condições de seca, as plantas geralmente alteram a assimilação de carbono e a distribuição de açúcar para adaptação (Kaur et al. 2021). O aumento do acúmulo de açúcares solúveis como a sacarose, é fator importante nesse processo, contribuindo mais significativamente do que a prolina para a osmorregulação celular em *Arabidopsis* estressada pela seca (Khan et al. 2020; Gurrieri et al. 2020; Kaur et al. 2021). Stefaniak et al. (2024) relata ainda que o acúmulo de açúcares pode proporcionar recuperação mais rápida da planta após o período de estresse. Em contraste, açúcares como a celobiose, maltose e sorbitol (Fig. 10-B-D) apresentaram redução. Embora seja comum o registro do acúmulo de açúcares em condições de estresse abiótico como a seca (Pleyerová et al. 2022; Kumar et al. 2021; Wang et al. 2024), algumas plantas podem apresentar regulação negativa na transcrição de genes envolvidos na resposta ao estresse, limitando esse acúmulo (Wu et al. 2015).

A estação chuvosa (C) influenciou o acúmulo de ácido glicérico, ácido galacturônico, ácido 4-hidroxibenzoico, etanolamina, moralina e sorbitol. De forma geral, ácidos orgânicos como o ácido glicérico possuem uma natureza “versátil” que

permite atuar em múltiplas respostas de estresse nas plantas, modulando a adaptação ao ambiente (Igamberdiev e Bykova, 2018; Pachal et al. 2021). Embora seja incipiente o estudo da função desses compostos nas variações sazonais, o acúmulo em condições normais de disponibilidade hídrica pode refletir uma estratégia de armazenamento de energia das plantas, preparando para estresses abióticos futuros (Du et al. 2012). Da mesma forma, o aumento na concentração de ácido galacturônico pode indicar incremento nos níveis de pectina nas paredes celulares primárias das folhas em expansão (Jardine et al. 2022), está associado ao crescimento e a resistência celular. O ácido 4-Hidroxibenzoico, análogo ao ácido salicílico, desempenha papel importante na regulação hormonal e na função mitocondrial (Nechaeva et al. 2020). Esse metabólito, também é um intermediário promissor para a produção de bioprodutos com aplicações biotecnológicas em alimentos, cosméticos, farmacêuticos e fungicidas (Wang et al. 2018; Safarova 2022), semelhante a moranolina, um alcaloide importante na indústria farmacêutica pelo seu potencial medicinal (Hussain et al. 2017). Espécies produtoras de moranolina tem sido estudada para o desenvolvimento de fármacos neuroprotetores, com potencial para tratamento de Alzheimer (Fátima et al. 2023; Hegazi et al. 2024), o que também representa um dos usos medicinais populares da *A. arvense*.

O aumento da concentração de etanolamina ao final da estação chuvosa pode indicar uma tentativa da planta para estabilizar membranas danificadas. Esse composto desempenha papel importante na embriogênese, no desenvolvimento de órgãos e na formação das membranas celulares e pode atuar como um sinalizador para iniciar a tolerância ao estresse, preparando a planta para enfrentar condições adversas no futuro (Rajaeian e Ehsanpour, 2015; Moussa et al. 2019). Polióis como sorbitol que são solutos compatíveis nas plantas, desempenham funções importantes na tolerância a estresses abióticos. Estudos demonstram que o aumento de sorbitol nas folhas após estresse por seca para algumas espécies (Jimenez et al. 2013; Yang et al. 2019). No entanto, a função nessas condições ainda não está totalmente clara, necessitando estudos mais aprofundados (Pleyerová et al. 2022).

O perfil metabólico da *A. arvense* revelou diferença na concentração de diferentes metabólitos, com aumento e redução, cujo equilíbrio é importante para que a espécie consiga atravessar o período de seca. Esses resultados indicam respostas significativas da espécie em termos de resistência e sobrevivência à sazonalidade hídrica do ambiente. Também indicam insights para o desenvolvimento de planos de manejo na modulação da produção de compostos bioativos e possíveis rotas de estudos para

produção de plantas mais resistentes a alterações ambientais, como as decorrentes das mudanças climáticas.

4.5 Conclusão

A *Anemopaegma arvense* altera os metabólitos durante as diferentes estações do ano. No período mais seco (início e final) há maior acúmulo de aminoácidos (ácido aspártico, serina e fenilalanina) e sacarose. Esses compostos têm função osmoprotetoras para auxiliar a planta a passar pelo período de menor disponibilidade hídrica. Da mesma forma, foi possível perceber alterações na diversidade e abundância de compostos bioativos na seca. Embora ainda não esteja totalmente esclarecido a função dos metabólitos acumulados durante a estação chuvosa, necessitando de estudos mais aprofundados, o aumento de metabólitos reparadores sugere uma tentativa da espécie em recuperar membranas danificadas e preparar a planta para novos ciclos de seca. O acúmulo diferencial ocorreu principalmente para ácidos orgânicos, etanolamina, sorbitol e dois compostos de interesse medicinal. O conhecimento do perfil metabólico da *A. arvense* no enfrentamento da sazonalidade hídrica abre perspectivas de estudos para melhor compreensão das estratégias relacionadas a sobrevivência e possível adaptação no cenário de intensificação da seca no ambiente. Bem como possibilidades de manejo para a utilização e conservação da espécie.

4.6 Referências

Abreu, I.N., Mazzafera, P. (2005). Effect of water and temperature stress on the content of active constituents of *Hypericum brasiliense* Choisy. *Plant Physiology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2005.01.020>

Alves, W.F., Roig, H., Kalin, L., Prado, L., Valdir, F.S, Steinke, A. (2022). Analyzing trends in rainfall and their impacts in water management in a Cerrado region in Brazil. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-830788/v1>.

Ashrafi, M., Mohammad-Reza, A.M., Moradi, P., MohseniFard, E., Shekari, F., Kompany-Zareh, M. (2018). Effect of drought stress on metabolite adjustments in drought tolerant and sensitive thyme. *Plant Physiology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.09.009>.

Batista-Silva, W., Heinemann, B., Rugen, N., Nesi, A.N., Araújo, W., Braun, H.P., Hildetrandt, T.M. (2019). The role of amino acid metabolism during abiotic stress release. *Plant, Cell & Environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.13518>

Boonman, C.C, Huijbregts, M.A.J., Benítez-López, A., Schipper, A.M., Thuiller, W., Santini, L. (2022). Divers. Distrib. 28. 25-37. <https://doi.org/10.1111/ddi.13431>.

Braga, A., Laurini, M. (2024). Spatial heterogeneity in climate change effects across Brazilian biomes. Sci Rep. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67244-x>.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 148, de 7 de junho de 2022.

Bustamante, M.M.M., Nardoto, G.B., Pinto, A. S., Resende, J.C.F., Takahashi, F.S.C., Vieira, L.C.G. 2012. Potential impacts of climate change on biogeochemical functioning of Cerrado ecosystems. Braz. J. Biol. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400005>.

Chen, K., Li, G.-J., Bressan, R.A., Song, C.-P., Zhu, J.-K. and Zhao, Y. 2020. Abscisic acid dynamics, signaling, and functions in plants. J. Integr. Plant Biol, 62: 25-54. <https://doi.org/10.1111/jipb.12899>.

Chuine, I., Régnière, J. (2017). Process-based models of phenology for plants and animals. Annu Rev Ecol Evol Syst, 48, 159-182. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022706>.

Costa-Coutinho, J.M., Jardim, M.A.G., Miranda, L.S., Castro, A.A.J.F. (2022). Climate change effects on marginal savannas from central-north Brazil. An. Acad. Bras. Cienc. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210191>

Del-Claro, K., Slingardi, H.M.T. (2019). The study of biotic interactions in the Brazilian Cerrado as a path to the conservation of biodiversity. An. Acad. Bras. Cienc. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180768>.

Du, H., Wang, Z., Yu, W., Huang, B. (2012). Metabolic Responses of Hybrid Bermudagrass to Short-term and Long-term Drought Stress. Journal of the American Society for Horticultural Science J. Amer. Soc. Hort. Sci. <https://doi.org/10.21273/JASHS.137.6.411>.

Dumchott, K., Dechornat, J., Merchant, A. (2019). Water deficit elicits a transcriptional response of genes governing d-pinitol biosynthesis in soybean (*Glycine max*). Int. J. Mol. Sci. <https://doi.org/10.3390/ijms20102411>.

El-Betagi, H.S.; Mohamed, H.I.; Sofy, M.R. (2020). Role of Ascorbic acid, Glutathione and Proline Applied as Singly or in Sequence Combination in Improving Chickpea Plant through Physiological Change and Antioxidant Defense under Different Levels of Irrigation Intervals. Molecules. <https://doi.org/10.3390/molecules25071702>.

ESTAÇÃO METEOROLOGICO DO IFMT. Boletim Meteorológico do IFMT-Campus Confresa, 2022. Disponível em:< <https://sites.google.com/ifmt.edu.br/boletim-meteorolgicos-cfs/boletins-agrometeorol%C3%B3gicos> >

Fátima, M., Bukhari, M.N., Bukhari, J.S.S., dar, M.A., Ouyang, Z. (2023). Glycoside flavonoids of genus Morus: Phytochemistry, Biosynthesis and Pharmacological activities. TechRxiv. <https://www.techrxiv.org/doi/full/10.22541/au.169969121.10454481/v1>.

Franco, D.M., Saldanha, L., Lima Neto, J.S., Santos, L.C., Dokkedal, A.L., Almeida, L.F.R. (2016). Seasonal variation in allelopathic potential of the leaves of *Copaifera langsdorffii* Desf. Acta Botanica Brasilica. <https://doi.org/10.1590/0102-33062015abb0296>.

Gharibi, S., Tabatabaei, B.E.S., Saeidi, G., Goli, S.A.H. (2016). Effect of Drought Stress on Total Phenolic, Lipid Peroxidation, and Antioxidant Activity of *Achillea* Species. Appl Biochem Biotechnol. <https://doi.org/10.1007/s12010-015-1909-3>.

Gomes, A.M.F., Rodrigues, A.P., António, C., Rodrigues, A.M., Leitão, A.E., Batista-Santos, P., Nhandumbo, N., Massinga, R., Barros, A.I.R., Ramalho, J.C. (2020). Drought response of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) landraces at leaf physiological and metabolite profile levels. Environmental and Experimental Botany. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104060>

Guo, R., Shi, L., Jiao, Y., Li, M., Zhong, X., Gu, F., Liu, Q., Xia, X., Li, H. (2018). Metabolic responses to drought stress in the tissues of drought-tolerant and drought-sensitive wheat genotype seedlings. AoB Plants. <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply016>

Gurrieri, L., Merico, M., Trost, P., Forlani, G., Sparla, F. (2020). Impact of Drought on Soluble Sugars and Free Proline Content in Selected *Arabidopsis* Mutants. Biology. <https://doi.org/10.3390/biology9110367>.

Hasan, MM, Liu, X, Yao, G, Liu, J, Fang, X. (2024). Ethylene-mediated stomatal responses to dehydration and rehydration in seed plants, Journal of Experimental Botany. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae060>.

Hegazi, N.M., Mohamed, T.A., Salama, A., Hamed, A.R., Saad, H.H., Saleh, I.A., Reda, E.H., Elsayed, A., Ibrahim, M.A., Paré, P.W., Efferth, T., Hegazy, M.E.F. (2024). Molecular networking-guided investigation of the secondary metabolome of four *Morus* species and their *in vivo* neuroprotective potential for the mitigation of Alzheimer's disease. Food e Function. <https://doi.org/10.1039/d3fo05711a> .

Hildebrandt, T.M. (2018). Synthesis versus degradation: Directions of amino acid metabolism during *Arabidopsis* abiotic stress response. Plant Molecular Biology. <https://doi.org/10.1007/s11103-018-0767-0>.

Hofmann, G.S., Silva, R.C., Weber, E.J., Barbosa, A.A., Oliveira, L.F.B., Alves, R.J.V., Hasenack, H., Schossler, V., Aquino, F.E., Cardoso, M.F. (2023). Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. Sci Rep. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38174-x>.

Hussain, F., Rana, Z., Shafique, H., Malik, A., Hussain, Z. (2017). Phytopharmacological potential of different species of *Morus alba* and their bioactive phytochemicals: A review. Journal of Tropical Biomedicine. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.09.015>.

Igamberdiev, A.U., Bykova, N.V. (2018). Role of organic acids in the integration of cellular redox metabolism and mediation of redox signalling in photosynthetic tissues of higher plants. Free Radic Biol Med. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.01.016>.

Jardine, K.J., Dewhirst, R.A., Som, S., Lei, J., Tucker, E., Young, R.P., Portillo-Estrada, M., Gao, Y., Su, L., Fares, S., Castanha, C., Scheller, H.V. (2022). Mortimer JC. Cell wall ester modifications and volatile emission signatures of plant response to abiotic stress. *Plant Cell Environ.* <https://doi.org/10.1111/pce.14464>.

Jia, X., Sun, C., Zuo, Y., Li, G., Li, G., Ren, L., Chen, G. (2016). Integrating transcriptomics and metabolomics to characterise the response of *Astragalus membranaceus* Bge. var. *mongolicus* (Bge.) to progressive drought stress. *BMC Genom.* <http://doi.org/10.1186/s12864-016-2554-0>.

Jiménez, S., Dridi, J., Gutiérrez, D., Moret, D., Irigoyen, J.J., Moreno, M.A., Gogorcena, Y. (2013). Physiological, biochemical and molecular responses in four *Prunus* rootstocks submitted to drought stress. *Tree Physiol.* <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt074>.

Kassambara, A. Mundt, F. (2020). Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses_. R package version 1.0.7, <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.

Kaur, H., Kohli, S.K., Khanna, K., Bhardwai, R. (2021). Scrutinizing the impact of water deficit in plants: Transcriptional regulation, signaling, photosynthetic efficacy, and management. *Physiologia Plantarum.* <https://doi.org/10.1111/ppl.13389>

Khan, N., Ali, S., Zandi, P., Mehmoord, A., Ullah, S., Ikram, I., Shahid, M.A.S., Babar, A. (2021). Role of sugars, amino acids and organic acids in improving plants abiotic stress tolerance. [http://dx.doi.org/10.30848/PJB2020-2\(24\)](http://dx.doi.org/10.30848/PJB2020-2(24)).

Kang, G., Yan, D., Chen, X., Yang, L., Zeng, R. (2020). HbWRKY82, a novel IIC WRKY transcription factor from *Hevea brasiliensis* associated with abiotic stress tolerance and leaf senescence in *Arabidopsis*. *Physiologia Plantarum.* <https://doi.org/10.1111/ppl.13238>

Kumar, M., Kumar, P.M., Kumar, N., Bajpai, A.B., Siddique, K.H.M. (2021). Metabolomics and Molecular Approaches Reveal Drought Stress Tolerance in Plants. *Int J Mol Sci.* <http://doi.org/10.3390/ijms22179108>.

Lahuta, L.B., Szablińska-Piernik, J.; Horbowicz, M. 2022. Changes in Metabolic Profiles of Pea (*Pisum sativum* L.) as a Result of Repeated Short-Term Soil Drought and Subsequent Re-Watering. *Int. J. Mol. Sci.* <https://doi.org/10.3390/ijms23031704>.

Lenth, R. (2022). Emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.7.5. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>.

Li, Y., Kong D., Fu, Y., Sussman, M.R., Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. *Plant Physiol. Biochem.* <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006>.

Li, M., Li, P., Ma, F. Dandekar, A.M., Cheng, L. (2018). Sugar metabolism and accumulation in the fruit of transgenic apple trees with decreased sorbitol synthesis. *Hortic Res.* <https://doi.org/10.1038/s41438-018-0064-8>.

Liao, Z., Liu, L., Rennenberg, H., Du, B. (2024). Water deprivation modifies the metabolic profile of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) leaves. *Physiol Plant*. <http://doi.org/10.1111/ppl.14365>.

Lin, C.Y., Tian, Y., Nelson-Vasilchik, K., Hague, J., Kakumanu, R., Lee, M.Y., Pidatala, V.R., Trinh, J., De Bem, C.M., Dalton, J., Northen, T.R., Baidoo, E.E.K., Simmons, B.A., Gladden, J.M., Scown, C.D., Putnam, D.H., Kausch, A.P., Scheller, H.V., Eudes, A. (2022). Engineering sorghum for higher 4-hydroxybenzoic acid content. *Metab Eng Commun*. <http://doi.org/10.1016/j.mec.2022.e00207>.

Luo, Q., Xie, H., Chen, Z., Ma, Y., Yang, H., Yang, B., Ma, Y. 2023. Morphology, photosynthetic physiology and biochemistry of nine herbaceous plants under water stress. *Front Plant Sci*. <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1147208>.

Macedo, A.L., Boaretto, A.G., Silva, A.N., Maia, D.S., Siqueira, J.M., Silva, D.B., Carollo, C.A. (2021). Evaluation of the Effect of Brazilian Savanna (Cerrado) Seasons in Flavonoids and Alkaloids Accumulation: The Case of *Duguetia furfuracea*. *J. Braz. Chem. Soc*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210075>.

Mangnier, L., Bodein, A. Mariaz, M., Boyer, M.P.S., Mathieu, A., Vashist, N., Bramble, M.S., Droit, A. (2024). Decoding the Microbiome-Metabolome Nexus: A Systematic Benchmark of Integrative Strategies. *Biorxiv*. <https://doi.org/10.1101/2024.01.26.577441>.

Martins, S.J., Faria, A.F., Pedroso, M.P., Cunha, M.G., Rocha, M.R., Medeiros, F.H.V. (2019) Microbial volatiles organic compounds control anthracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*) in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biological control*. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.01.003>

Melo, G.A., Abreu, I.N., de Oliveira, M.B., Budzinski, I.G.F., Silva, L.V., Pimenta, M.A.S., Moritz, T.A. (2021). Metabolomic study of *Gomphrena agrastis* in Brazilian Cerrado suggests drought-adaptive strategies on metabolism. *Sci Rep*. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92449-9>

Medeiros, P.C., Nunes, Y.R.F., Cruz, J.P., Souza, D.M., Ávila, M.A., Moarais-Costa, F., Arruda, S.R., Vasconcelos, V.O., Vieira, T.M., Moura, A.P.V. (2021). Seasonal Variation in the Content of Condensed Tannins in Leaves of *Xylopia emarginata* Mart. (Annonaceae) in Response to Phenology and Climate. *Journal of Agricultural Science*. <https://doi.org/10.5539/jas.v13n10p142>.

Mishra, N., Jiang, C., Chen, L., Paul, A., Chatterjee, A., Shen, G. (2023). Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. *Front Plant Sci*. <http://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>.

Mouradi, M., Farissi, M., Bouizgaren, A., Makoudi, B., Kabbadj, A., Very, A.A. (2015). Effects of water deficit on growth, nodulation and physiological and biochemical processes in *Medicago sativa*-rhizobia symbiotic association. *Arid Land Research and Management*. <https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1073194>.

Motyleva, S., Kozak, N., Kabashnikova, L. (2022). Effect of drought stress on metabolite synthesis in *Actinidia Arguta* Leaves. BIO Web of Conferences. <http://doi.org/10.1051/bioconf/20224301021>.

Moussa, H.R., El-Sayed, M.S., El-Sayed, M.S.E., Ghramh, H.A. (2019). Ethanolamine affects physiological responses of salt-treated jute plants. International Journal of Vegetable Science. <https://doi.org/10.1080/19315260.2019.1566187>.

Nechaeva, L., Nikolaeva, T.N., Zagoskina, N.V. (2020). Salicylic and Hydroxybenzoic Acids Affect the Accumulation of Phenolic Compounds in Tea-Plant Cultures in vitro. Biol Bull Russ Acad Sci. <https://doi.org/10.1134/S1062359020040093>.

Negin, B., Moshelion, M. (2016). The evolution of the role of ABA in the regulation of water-use efficiency: From biochemical mechanisms to stomatal conductance. Plant Science. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.05.007>

Pacheco, D.G., Andrade, A.M.d. (2024). Monitoring agricultural drought using different indices based on remote sensing data in the Brazilian biomes of Cerrado and Atlantic Forest. Int J Biometeorol. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02731-4>.

Panchal, P., Miller, A.J., Giri, J. (2021). Organic acids: versatile stress-response roles in plants. Journal of Experimental Botany. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab019>.

Pan, L., Meng, C., Wang, J., Ma, X., Fan, X., Yang, Z., Zhou, M., Zhang, X. (2018). Integrated omics data of two annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) genotypes reveals core metabolic processes under drought stress. BMC Plant Biol. <http://doi.org/10.1186/s12870-018-1239-z>.

Parkash, V., Singh, S. (2020). A Review on Potential Plant-Based Water Stress Indicators for Vegetable Crops. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su12103945>.

Patel, M., Fatnani, D., Parida, A.K. (2021). Silicon-induced mitigation of drought stress in peanut genotypes (*Arachis hypogaea* L.) through ion homeostasis, modulations of antioxidative defense system, and metabolic regulations. Plant Physiology and Biochemistry. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.003>.

Pires, M.V., Pereira Júnior, A.A., Medeiros, D.B., Daloso, D.M., Pham, P.A., Barros, K.A., Engqvist, M.K., Florian, A., Krahnert, I., Maurino, V.G. (2016). The influence of alternative pathways of respiration that utilize branched-chain amino acids following water shortage in *Arabidopsis*. Plant Cell Environ. <https://doi.org/10.1111/pce.12682>.

Pleyerová, I., Hamet, J., Konrádová, H., Lipavská, H. (2022). Versatile roles of sorbitol in higher plants: luxury resource, effective defender or something else? Planta. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03925-z>.

Presini, F., Di Carmine, G., Giovannini, P.P., Cristofori, V., Lerin, L.A., Bortolini, O., Trapella, C., Fantinati, A. (2021). Chemoenzymatic Stereodivergent Synthesis of All the Possible Stereoisomers of the 2,3-Dimethylglyceric Acid Ethyl Ester. Catalysts. <https://doi.org/10.3390/catal11121440>.

Prestes, N.C.C.S., Marimon, B.S., Morandi, P.S., Reis, S.M., Marinon Junior, B.H., Cruz, W.J.A., Oliveira, E.A., Mariano, L.H., Elias, F., Santos, D.M., Esquivel-Muelbert, A., Phillips, O.L. (2022). Flora. 4. Impact of the extreme 2015-16 El Niño climate event on forest and savanna tree species of the Amazonia-Cerrado transition. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2024.152597>.

Pompeu, J. (2022). Performance of an automated conservation status assessment for the megadiverse vascular flora of Brazil. *Journal for Nature Conservation*. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126272>.

Rangani, J., Panda, A., Parida, A.K. (2020). Metabolomic study reveals key metabolic adjustments in the xerohalophyte *Salvadora persica* L. during adaptation to water deficit and subsequent recovery conditions. *Plant Physiol Biochem*. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.036>.

Rajaeian, S.O., Ehsanpour, A.A. (2015). Physiological responses of tobacco plants (*Nicotiana rustica*) pretreated with ethanolamine to salt stress. *Russ J Plant Physiol*. <https://doi.org/10.1134/S1021443715020156>.

Ritonga, F.G., Ngatia J. N., Song R. X., Farooq U., Somadona S., Lestari A. T., Chen S. 2021. Abiotic stresses induced physiological, biochemical, and molecular changes in *Betula platyphylla*: a review. *Silva Fennica*. <https://doi.org/10.14214/sf.10516>.

Rodríguez-Páez, L.A., Seleiman, M.F., Almmad, B.A., Pineda-Rodríguez, Y.Y., Pompelli, M.F., Martina, A.O., Dias-Pereira, J., Araújo, W.L. (2024). Photosynthesis, Anatomy, and Metabolism as a Tool for Assessing Physiological Modulation in Five Native Species of the Brazilian Atlantic Forest. *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants13141906>.

Safarova, I. (2022). Hydroxybenzoic acid derivatives and their biological activity. *PPOR*. <https://ppor.az/index.php/ppor/article/view/255>

Samec, D., Karalija, E., Sola, I., Bok, V., Salopek-Sondi B. (2021). The Role of Polyphenols in Abiotic Stress Response: The Influence of Molecular Structure. *Plants (Basel)*. <https://doi.org/10.3390/plants10010118>

Sampaio, B., Edrada-Ebel, R., da Costa, F. (2016). Effect of the environment on the secondary metabolic profile of *Tithonia diversifolia*: a model for environmental metabolomics of plants. *Sci Rep*. <https://doi.org/10.1038/srep29265>

Sano, E.E., Rodrigues, A.A., Martins, E.S., Bettioli, G.M., Bustamante, M.M.C., Bezerra, A.S., Couto, A.F., Vasconcelos, V., Schüler, J., Bolfe, E.L. (2019). Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation, *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>.

Shen, J., Wang, S., Sun, L., Wang, Y., Fan, K., Li, C., Wang, H., Bi, C., Zhang, F., Ding, Z. (2022). Dynamic changes in metabolic and lipidomic profiles of tea plants during drought stress and re-watering. *Front Plant Sci*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.978531>.

Silva, F.A.M., Assad, E.D., Evangelista, B.A. (2008). Caracterização climática do Bioma Cerrado. In: Sano, S.M., Almeida, SP., Ribeiro, JF (ed). (2008) Cerrado: Ecologia e Flora. Embrapa.

Silva, K.O., Sant'Ana, J.A.V., Silva Júnior, J.J., Castro, Y.O. (2022). Estimativa de evapotranspiração de referência (ETO) por diferentes fórmulas empíricas no município de Confresa-MT. Revista PesquisAgro. <http://doi.org/10.33912/pagro.v5i01.1100>.

Spormann, S., Nadais, P., Sousa, F., Pinto, M., Martins, M., Sousa, B., Fidalgo, F., Soares, C. (2023). Accumulation of Proline in Plants under Contaminated Soils—Are We on the Same Page? Antioxidants. <https://doi.org/10.3390/antiox12030666>.

Stríkis, N.M., Buarque, P.F.S.M., Cruz, F.W. et al. (2024). Modern anthropogenic drought in Central Brazil unprecedented during last 700 years. Nat Commun. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45469-8>

Stefaniak, E.Z., Tissue, D.T., Deear, R., Medlyn, B.E. (2024). Optimal carbon storage during drought. Tree Physiology. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpae032>

Tamang, BG., Li, S., Rajasundaram, D., Lamichhane, S., Fukao, T. (2021). Overlapping and stress-specific transcriptomic and hormonal responses to flooding and drought in soybean. Plant J. <http://doi.org/10.1111/tpj.15276>.

Tavares, C.J., Ribeiro Junior, W.Q., Ramos, M.L.G., Pereira, L.F., Muller, O., Casari, R.A.C.N., de Sousa, C.A.F., da Silva, A.R. (2023). Water Stress Alters Physiological, Spectral, and Agronomic Indexes of Wheat Genotypes. Plants. <https://doi.org/10.3390/plants12203571>.

Teixeira, T.M., Boeff, D.D., Carvalho, L.O., Ritter, M.R., Konrath, E.L. (2024). The traditional use of native Brazilian plants for male sexual dysfunction: Evidence from ethnomedicinal applications, animal models, and possible mechanisms of action. Journal of Ethnopharmacology. <http://doi.org/10.1016/j.jep.2023.116876>.

Vieira, E.A., Silva, M.G., Moro, C.F., Laura, V.A. (2017). Physiological and biochemical changes attenuate the effects of drought on the Cerrado species *Vatairea macrocarpa* (Benth.) Ducke. Plant Physiology and Biochemistry. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.022>.

Vieira, E.A., Silva, M.G., Gomes, A.S., Urakawa, A.H., Barros, A.L. (2021). Carbon-nitrogen metabolism and oxidative stress in young plants of *Dipteryx alata* Vog. subjected to seasonal water regimes in the Cerrado. Environmental and Experimental Botany. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104361>.

Vital, R.G., Müller, C., Freire, F.B.S., Silva, F.B., Batista, P.F., Fuentes, D., Rodrigues, A.A., Moura, L.M.F., Daloso, D.M., Silva, A.A., Merchant, A., Costa, A.C. (2022). Metabolic, physiological and anatomical responses of soybean plants under water deficit and high temperature condition. Sci Rep. <http://doi.org/10.1038/s41598-022-21035-4>.

Yadav, A.K., Carroll, A.J., Estavillo, G.M., Rebetzke, G.J., Pogson, B.J. (2019). Wheat drought tolerance in the field is predicted by amino acid responses to glasshouse-imposed drought. *J Exp Bot.* <https://doi.org/10.1093/jxb/erz224>.

Yadav, B., Jogawat, A., Rahman, M.S., Narayan, O.P. (2021). Secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. *Gene Reports.* <https://doi.org/10.1016/j.genrep.2021.101040>.

Yang, Ds, Zhang, J., Li, Mx., Shi, Lx. (2017). Metabolomics Analysis Reveals the Salt-Tolerant Mechanism in *Glycine soja*. *J Plant Growth Regul* <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9654-6>.

Yang, J., Zhang, J., Li, C., Zhang, Z., Ma, F., Li, M. (2019). Response of sugar metabolism in apple leaves subjected to short-term drought stress. *Plant Physiol Biochem.* <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.05.025>.

Zandalinas, S.I., Balfagón, D., Gómez-Cadenas, A., Mittler, R. (2022). Plant responses to climate change: metabolic changes under combined abiotic stresses. *Experimental Botany.* <https://doi.org/10.1093/jxb/erac073>.

Zandi, P., Schnug, E. (2022). Reactive Oxygen Species, Antioxidant Responses and Implications from a Microbial Modulation Perspective. *Biology.* <https://doi.org/10.3390/biology11020155>.

Zhao, M., Ren, Y., Wei, W., Yang, J., Zhong, Q., Li, Z. (2021). Metabolite Analysis of Jerusalem Artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) Seedlings in Response to Polyethylene Glycol-Simulated Drought Stress. *International Journal of Molecular Sciences.* <http://doi.org/10.3390/ijms22073294>.

Zheng, Y., Cabassa-Hourton, C., Planchais, S., Lebreton, S., Savouré, A. (2021). The proline cycle as an eukaryotic redox valve. *Jornal de Botânica Experimental.* <https://doi.org/10.1093/jxb/erab361>.

Zhou, H., Hou, L., Yang, G., Wang, Y., Wang, X. (2022). Compensatory growth as a response to post-drought in grassland. *Front Plant Sci.* <http://doi.org/10.3389/fpls.2022.1004553>.

Zimbres, B., Shimbo, J., Bustamante, M., Levick, S., Miranda, S., Roitman, I., Silvério, D., Gomes, L., Fagg, C., Alencar, A. (2020). Savanna vegetation structure in the Brazilian Cerrado allows for the accurate estimation of aboveground biomass using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management.* <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117798>.

Wang, S., Bilal, M., Hu, H., Wang, W., Zhang, X. (2018). 4-Hydroxybenzoic acid-a versatile platform intermediate for value-added compounds. *Appl Microbiol Biotechnol.* <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8815-x>.

Wang, X., Chen, S., Shi, X., Liu, D., Zhao, P., Lu, Y., Cheng, Y., Liu, Z., Nie, X., Song, W., Sun, Q., Xu, S., Ma, C. (2019). Hybrid sequencing reveals insight into heat sensing and signaling of bread wheat. *Plant J.* <http://doi.org/10.1111/tpj.14299>.

Wang, X., Zhang, J., Song, J., Huang, M., Cai, J., Zhou, Q., Dai, T., Jiang, D. (2020). Abscisic acid and hydrogen peroxide are involved in drought priming-induced drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Biol* (Stuttg). <http://doi.org/10.1111/plb.13143>.

Wang, X., Li, Q., Xie, J., Huang, M., Cai, J., Zhou, Q., Dai, T., Jiang, D. (2021). Abscisic acid and jasmonic acid are involved in drought priming-induced tolerance to drought in wheat. *The Crop Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.06.002>.

Wang, Z., Yang, Y., Yadav, V., Zhao, W., He, Y., Zhang, X., Wei, C. (2022). Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.06.009>.

Wang, C., Lu, C., Wang, J., Liu, X., Wei, Z., Qin, Y., Zhang, H., Wang, X., Wei, B., Lv, W., Um, G. (2024). Molecular mechanisms regulating glucose metabolism in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds under drought stress. *BMC Plant Biol*. <http://doi.org/10.1186/s12870-024-05510-w>.

Winaya, A., Maftuchah, Zainudin, A. (2020). The identification of osmoprotectant compounds from *Jatropha curcas* Linn. plant for natural drought stress tolerance. *Energy Reports*. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.037>.

Wu, R., Song, Z., Dong, B., Chen, T., Wang, M., Cao, H., Du, T., Wang, S., Li, N., Yang, Q., Fu, Y., Meng, D. (2015). Sorbitol Reduces Sensitivity to *Alternaria* by Promoting Ceramide Kinases (*CERK*) Expression through Transcription Factor *Pswrky25* in *Populus* (*Populus simonii* Carr.). *Genes*. <http://doi.org/10.3390/genes13030405>.

5. CONCLUSÃO GERAL

A *Anemopaegma arvense* é uma planta nativa do Cerrado, está exposta a constantes variações de sazonalidade hídrica e como muitas espécies precisa promover ajustes para sobreviver a intensificação das mudanças climáticas. Os resultados indicam que para atravessar o período da seca, a *A. arvense* ajusta a anatomia foliar promovendo o aumento na espessura de tecidos foliares, como o parênquima paliçádico e esponjoso, mesofilo e epiderme adaxial. Com o avanço da redução da disponibilidade hídrica, a concentração do ácido abscísico que começou a se acumular no início da seca, aumentou conforme a seca intensificou, promovendo o fechamento estomático, consequentemente afetando as trocas gasosas.

O fechamento estomático reduziu a taxa e o desempenho fotossintético no período mais seco, no entanto, não foi observado comprometimento do aparato fotossintético. A *A. arvense* ativou mecanismos de dissipação de energia luminosa na forma de calor e manteve o fluxo de transporte de elétrons estável.

O sistema de defesa antioxidante por meio das enzimas (SOD, CAT e APX) foi ativado no período mais seco em resposta ao aumento do MDA, reduzindo posteriormente na estação chuvosa, refletindo a resiliência da planta. Foi observado também ajustes no metabolismo da *A. arvense* na seca com o aumento principalmente de sacarose e aminoácidos osmoprotetores e acúmulo diferencial de metabólitos secundários de interesse medicinal, cosmético e biocidas indicando *insight* nas propostas para construção de futuros planos de manejo da espécie. Na estação chuvosa houve aumento de compostos que desempenham função reparadora. Mediante as alterações hídricas sazonais, a planta mostrou-se tolerante e resiliente, permitindo a sobrevivência no ambiente perante as contantes mudanças climáticas.