



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

RENATO OLIVEIRA DE SOUSA

**RASTREAMENTO DE INDUTORES DE TOLERÂNCIA EM CULTIVARES DE
ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L) SOB DÉFICIT HÍDRICO**

Bom Jesus – PI

2024

RENATO OLIVEIRA DE SOUSA

**RASTREAMENTO DE INDUTORES DE TOLERÂNCIA EM CULTIVARES DE
ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L) SOB DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Produção Vegetal como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda

Coorientadora: Dr^a. Stelamaris de Oliveira Paula Marinho

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial do Campus Professora Cinobelina Elvas
Serviço de Processamento Técnico

S725r Sousa, Renato Oliveira de.
 Rastreamento de indutores de tolerância em cultivares
 algodão (*Gossypium hirsutum* L.) sob déficit hídrico./ Renato
 Oliveira de Sousa. – 2024.
 102 f.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí,
 Campus Professora Cinobelina Elvas, Programa de Pós-
 graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus-PI, 2024.
 Orientação: “Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda”.

1. Algodoeiro-água. 2. Restrição hídrica. 3. Água-
agricultura. I. Sousa, Renato Oliveira de. II. Miranda,
Rafael de Souza. III. Título.

CDD 627

RENATO OLIVEIRA DE SOUSA

**RASTREAMENTO DE INDUTORES DE TOLERÂNCIA EM CULTIVARES DE
ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L) SOB DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, do Campus Professora Cinobelina Elvas, da Universidade Federal do Piauí, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de Concentração: Produção Vegetal

Linha de Pesquisa: Propagação e Manejo Cultural de Plantas.

Aprovado em 23 de fevereiro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda (Orientador)
Universidade Federal do Piauí – UFPI/CCA

Dr^a. Stelamaris de Oliveira Paula Marinho (Coorientadora)
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Francisco de Alcântara Neto
Universidade Federal do Piauí - UFPI/CCA

Prof. Dr. Humberto Henrique de Carvalho
Universidade Federal do Ceará – UFC/DBBM

À Deus.

In memoriam:

Aos meus amados avós maternos Maria José &
Pedro Luís, ao meu avô paterno Tércisio, ao meu
amado tio Etevaldo.

Dedico.

AGRADECIMENTO

À Deus, pela dádiva da vida, por ele me levantar todos os dias com saúde e coragem para enfrentar os desafios e por todas as bênçãos que me permite viver, á ele toda honra e glória sempre.

Aos Meus pais Osmarina e Luciano e irmãos Karina e Renan pelo apoio e amor incondicional. As minhas sobrinhas amadas, Marjorie e Heloíse pela motivação que me trazem todos os dias.

Ao professor Dr. Rafael de Souza Miranda pelo desafio aceito e confiança depositada, por toda orientação e conselhos ao longo do trabalho que foram de grande valia para a boa execução.

A coorientadora Dr^a Stelamaris de Oliveira Paula Marinho, por toda a paciência, em ensinar, por ser um grande exemplo de ser humano e profissional e por sua genuína bondade e amizade.

A minha amiga e comadre Jeane Ferreira por ser meu porto seguro ao longo de toda essa trajetória ao qual dividimos. A Maria Tereza amada afilhada pelos sorrisos espontâneos.

Ao técnico do laboratório Fernando Borges, pelas orientações, ajuda e pela confiança a mim depositada em diversas ocasiões.

A todos os amigos que compõem o grupo de pesquisa Bioplant; Rodrigo Fonseca, Marcos Renan Leite, Teonis Batista, Valnice Silveira, Gonçalves Dauala, Jeane Ferreira, Karolayne Caetano, Manderson Nunes, Milena Luz, Flávia Marques, Gabriel Milarindo, Wesley Santos, Bruno Figueiredo e Ana Jéssica, pela ajuda na execução do estudo e pelos momentos de descontração.

As amigas sinceras que fiz em Bom Jesus; Sara Rocha, Sandra Silva, Adriana Rodrigues.

A minha grande amiga e companheira Cynthia Maria Gomes por sempre me ouvir e aconselhar.

À Universidade Federal do Piauí pela oportunidade de realização deste curso.

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), que concederam auxílio financeiro para a execução das pesquisas realizadas pelo grupo Bioplant.

E, por último, todas as pessoas que contribuíram de alguma maneira para o progresso deste projeto e não foram mencionadas.

Aqueles que semeiam com lágrimas,
com cantos de alegria colherão.
Aquele que sai chorando enquanto
lança a semente, voltará com cantos
de alegria, trazendo os seus feixes.

Salmos 126:5-6

RESUMO GERAL

A escassez de água representa um desafio para a agricultura, especialmente nas regiões semiáridas. O desenvolvimento de técnicas de gestão que melhorem os mecanismos de defesa contra o déficit hídrico é crucial para melhorar a produtividade das culturas agrícolas. O presente estudo foi desenvolvido para testar a hipótese que a aplicação de agentes sinalizadores ativa respostas de defesa para melhorar o desempenho de cultivares contrastantes de *Gossypium hirsutum* L. sob condições de déficit hídrico. Investigações fisiológicas, bioquímicas e de crescimento foram conduzidas em dois experimentos conduzidos em casa de vegetação. O primeiro experimento teve como objetivo identificar três cultivares de algodão contrastantes em resposta ao déficit hídrico e duas níveis hídricos caracterizados como controle e estresse. Após a seleção, o segundo experimento envolveu a pulverização foliar com moléculas sinalizadoras em plantas sob estresse. O **Capítulo 1** fornece uma visão geral do estado atual do conhecimento e discute temas-chave ao longo da pesquisa. O **Capítulo 2** apresenta os resultados do primeiro experimento, em que se investigou seis cultivares atualmente cultivadas na região semiárida para compreender suas características sob condições de limitação hídrica. Os dados revelaram que as cultivares de algodão apresentam respostas distintas, com alta sensibilidade a 40% da capacidade de campo (CC), representando um estresse severo. A irrigação com umidade no solo equivalente a 80% da CC mostrou-se uma estratégia viável para o cultivo das cultivares FM 970, FM 974 e FM 985, apresentando desempenho semelhante ou superior em relação às plantas cultivadas com 100% da CC. Entretanto, a disponibilidade de água equivalente a 60% da CC representou estresse hídrico moderado, onde as cultivares FM 970, FM 978 e FM 985 apresentaram maior tolerância. Esse desempenho superior foi associado com o acúmulo de pigmentos e eficiência fotossintética, resultando em menores danos oxidativos aos tecidos aéreos. Por outro lado, a sensibilidade das cultivares FM 911 e FM 912 ficou evidente devido à redução da biomassa, desempenho fotossintético e aumento da peroxidação lipídica. No **Capítulo 3** foram realizados estudos para elucidar o papel da aplicação de agentes sinalizadores (Ácido Salicílico - SA, Melatonina - MT e Peróxido de Hidrogênio - HP) na ativação de respostas de defesa de cultivares contrastantes de *G. hirsutum* L. sob

condições de déficit hídrico. Os dados revelaram que o déficit hídrico impõe severas restrições ao metabolismo e crescimento do algodoeiro. As plantas apresentaram respostas variáveis, cujos efeitos dependeram da interação entre o agente sinalizador e a cultivar em estudo. O ácido salicílico exógeno mitigou os danos causados pelo estresse no crescimento da cultivar FM 911, uma resposta atribuída à maior eficiência fotossintética e ao aumento do potencial antioxidante. Por outro lado, as cultivares tolerantes de algodão (FM 970) exibiram respostas fisiológicas relevantes quando tratadas com SA, MT e HP, associadas à alta eficiência fotossintética, acúmulo de pigmentos e redução do potencial osmótico. No entanto, estes tratamentos não resultaram no aumento do crescimento das plantas sob condições de estresse durante o período de estudo. Como conclusão, os dados fornecem informações sobre cultivares de algodão herbáceo (FM 970 e FM 974) com maior potencial para cultivo sob restrição hídrica. A aplicação do ácido salicílico pode constituir uma importante estratégia para cultivo de plantas FM 911 e FM 970 sob limitação hídrica, sendo capaz de aliviar os danos do estresse. Mais estudos são necessários para validar o potencial dos compostos sinalizadores no cultivo do algodoeiro sob restrição hídrica, especialmente visando avaliar o impacto dos tratamentos no potencial produtivo em condições de campo.

Palavras-chave: algodoeiro, desempenho fotossintético, restrição hídrica, semiárido, status hídrico, tolerância.

ABSTRACT

The water scarcity poses a challenge for agriculture, especially in semi-arid regions. Developing management techniques that enhance defense mechanisms against water deficit is crucial for improving the productivity of agricultural crops. The present study was conducted to test the hypothesis that the application of signaling agents activate defense responses to enhance the performance of contrasting cultivars of *Gossypium hirsutum* L. under drought. Physiological, biochemical, and growth investigations were carried out in two greenhouse experiments. The first experiment aimed to identify three contrasting cotton cultivars in response to water deficit and two water levels characterized as control and stress. After selection, the second experiment involved foliar spraying with signaling molecules on stressed plants. **Chapter 1** provides an overview of the current state of knowledge and discusses key themes throughout the research. **Chapter 2** presents the results of the first experiment, where six cultivars currently grown in the semi-arid region were investigated to understand their characteristics under water-limiting conditions. The data revealed that cotton cultivars exhibit distinct responses, with high sensitivity at 40% of field capacity (FC), representing severe stress. Irrigation with soil moisture equivalent to 80% of FC proved to be a viable strategy for cultivating FM 970, FM 974, and FM 985 cultivars, showing similar or superior performance compared to plants grown with 100% of FC. However, water availability equivalent to 60% of FC represented moderate water stress, where FM 970, FM 978, and FM 985 cultivars showed higher tolerance. This superior performance was associated with the accumulation of pigments and photosynthetic efficiency, resulting in lower oxidative damage to aerial tissues. On the other hand, the sensitivity of FM 911 and FM 912 cultivars was evident due to reduced biomass, photosynthetic performance, and increased lipid peroxidation. In **Chapter 3** the studies were carried out to elucidate the role of signaling compounds (Salicylic Acid - SA, Melatonin - MT, and Hydrogen Peroxide - HP) in activating defense responses of contrasting *G. hirsutum* L. cultivars under water deficit. The data revealed that water deficit imposes severe restrictions on cotton metabolism and growth. Plants showed variable responses, with effects depending on the interaction between the signaling molecule and the cultivar. Exogenous salicylic acid mitigated stress-induced damage to the growth of FM 911

cultivar, a response attributed to higher photosynthetic efficiency and increased antioxidant potential. In contrast, tolerant cotton cultivars (FM 970) exhibited relevant physiological responses when treated with SA, MT, and HP, associated with high photosynthetic efficiency, pigment accumulation, and reduced osmotic potential. However, these treatments did not result in increased plant growth under stress conditions during the study period. In conclusion, the data provide information on herbaceous cotton cultivars (FM 970 and FM 974) with greater potential for cultivation under water restriction. The application of salicylic acid may constitute an important strategy for cultivating FM 911 and FM 970 plants under water limitation, capable of alleviating stress-induced damage. Further studies are needed to validate the potential of signaling compounds in cotton cultivation under water restriction, especially to assess the impact of treatments on productive potential under field conditions.

Keywords: cotton plant, photosynthetic performance, water restriction, semiarid, water status, tolerance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do território Brasileiro destacando a localização de Bom Jesus, PI, em relação à sua posição dentro do bioma de transição entre Cerrado e Caatinga.....	44
Figura 2 - Crescimento em altura de cultivares de algodão sob distintos regimes hídricos.....	48
Figura 3 - Massa seca de raízes, caule, folhas, parte aérea, massa seca total, área foliar e tolerância ao déficit hídrico de cultivares de algodão cultivadas sob diferentes regimes hídricos.....	50
Figura 4 - Potencial osmótico, suculência foliar e peroxidação lipídica de cultivares de algodão sob diferentes regimes hídricos.	51
Figura 5 - Fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO ₂ , eficiência de carboxilação Rubisco, eficiência intrínseca do uso da água e eficiência instantânea do uso da água das cultivares de algodão sob diferentes regimes hídricos	53
Figura 6 - Teores de clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , total e de carotenóides em cultivares de algodão sob diferentes regimes hídricos.....	54
Figura 7 - Gráfico biplot para biomassa e atributos fisiológicos.....	55
Figura 8 - Crescimento em altura de cultivares de algodão cultivadas sob diferentes regimes hídricos e tratamentos com sinalizadores químicos.	76
Figura 9 - Área foliar, altura, diâmetro do caule, número de nós, número de botões florais e comprimento de raízes de cultivares de algodão sob diferentes regimes hídricos e submetidas a tratamentos com sinalizadores de tolerância.....	77
Figura 10 - Massa fresca da folha, caule, raízes e total de cultivares de algodão cultivadas sob diferentes regimes hídricos e tratamentos com sinalizadores	78
Figura 11 - Massa seca da folha, caule, raízes, total e tolerância relativa ao estresse de cultivares de algodão cultivadas sob diferentes regimes hídricos e tratamentos com sinalizadores	79

Figura 12 - Suculência foliar, teor relativo de água, potencial osmótico e temperatura de folhas de cultivares de algodão crescidas sob diferentes regimes hídricos e tratamentos com sinalizadores de tolerância.....	81
Figura 13 - Taxas de fotossíntese líquida, condutância estomática, concentração interna de CO ₂ , transpiração, e eficiência de carboxilação da Rubisco, eficiências do uso da água intrínseca e instantânea de cultivares de algodão sob diferentes regimes hídricos e tratamentos com sinalizadores	83
Figura 14 - Eficiência quântica máxima e efetiva do fotossistema II, dissipação fotoquímica e não fotoquímica, e taxa de transporte de elétrons de cultivares de algodão crescidas sob diferentes regimes hídricos e tratamentos com sinalizadores	85
Figura 15 - Teores de clorofila <i>a</i> , <i>b</i> , total, carotenoides e antocianinas de cultivares de algodão sob diferentes regimes hídricos e tratadas com sinalizadores de tolerância.....	86
Figura 16 - Teores de lignina nas raízes de cultivares de algodão sob diferentes tratamentos	88
Figura 17 - Atividade das enzimas peroxidase do ascorbato e peroxidase do guaiacol, e teores de malondialdeído/peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio de cultivares de algodão expostas aos diferentes tratamentos	89

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

A	Fotossíntese líquida
AS	Ácido salíclico
A/Ci	Eficiência de carboxilação da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco)
A/E	Eficiência instantânea do uso da água
A/gs	Eficiência intrínseca do uso da água
ACP	Análise de Componentes principais
APX	Peroxidase do ascorbato
ASA	Ácido ascórbico
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CAT	Catalase
CC	Capacidade de campo
Ci	Concentração interna de CO ₂
CN	Controle negativo
Clf <i>a</i>	Clorofila <i>a</i>
Clf <i>b</i>	Clorofila <i>b</i>
Clf total	Clorofila total
DAS	Dias após a semeadura
DMSO	Dimetilsulfóxido
<i>E</i>	Transpiração
EROs	Espécies reativas de oxigênio
G- POD	Peroxidase do guaiacol
<i>gs</i>	Condutância estomática
GSH	Glutathione
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
HP	Peróxido de hidrogênio
LA	Área foliar
MDA	Malondialdeído
MT	Melatonina
¹ O ₂	Oxigênio singleto
O ₂ ⁻	Superóxido

OH ⁻	Radical hidroxila
PH	Peroxido de hidrogênio
SDM	Massa seca da parte aérea
SFM	Massa fresca da parte aérea
SOD	Dismutase do superóxido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	19
2	ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL.....	22
3	CAPÍTULO 1: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1	Impactos do déficit hídrico em sistemas agrícolas sob a ótica da fisiologia vegetal.....	23
3.2	Sinalizadores de tolerância ao estresse hídrico.....	25
3.2.1	Melatonina como molécula primer.....	26
3.2.2	Peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) como agente sinalizador.....	27
3.2.3	Ácido salicílico como mitigador do déficit hídrico.....	29
3.3	A cultura do algodoeiro.....	30
3.3.1	Origem e aspectos morfológicos.....	30
3.3.2	Histórico da cotonicultura no Brasil.....	31
3.3.3	Cenário atual da produção de algodão.....	33
3.3.4	Impactos do déficit hídrico na cultura do algodão.....	33
3.4	Referências.....	34
4	CAPITULO 2: EFICIÊNCIA DA MAQUINARIA FOTOSSINTÉTICA E STATUS HÍDRICO SÃO DETERMINANTES PARA O DESEMPENHO DE CULTIVARES DE ALGODÃO (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) SOB DÉFICIT HÍDRICO.....	40
	RESUMO.....	40
4.1	Introdução.....	41
4.2	Material e Métodos.....	43
4.2.1	Área experimental.....	43
4.2.2	Condições de cultivo e tratamentos.....	43
4.2.3	Manejo da irrigação.....	44
4.2.4	Massa seca, área foliar e tolerância relativa ao estresse.....	45
4.2.5	Suculência foliar e potencial osmótico.....	45
4.2.6	Trocas gasosas.....	46
4.2.7	Pigmentos fotossintéticos.....	46
4.2.8	Peroxidação lipídica de membrana (MDA).....	46
4.2.9	Análise estatística.....	47

4.3	Resultados.....	47
4.3.1	Acúmulo de biomassa, área foliar e tolerância relativa ao estresse...	47
4.3.2	Potencial osmótico, suculência foliar e peroxidação lipídica.....	49
4.3.3	Eficiência da maquinaria fotossintética.....	51
4.3.4	Pigmentos fotossintéticos.....	54
4.3.5	Análise do componente principal.....	55
4.4	Discussão.....	56
4.4.1	O algodoeiro apresenta limite de tolerância ao déficit hídrico dependendo do regime hídrico.....	56
4.4.2	A eficiência da maquinaria fotossintética parece ser determinante para melhor desempenho do algodão sob déficit hídrico.....	57
4.4.3	A redução do dano oxidativo no algodão parece ser mais relevante para a tolerância ao estresse do que o ajuste osmótico.....	59
4.5	Conclusão.....	60
4.6	Referências.....	60
	CAPÍTULO 3: ÁCIDO SALICÍLICO EXÓGENO ALIVIA OS DANOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A MAQUINARIA	
5	FOTOSSINTÉTICA E CRESCIMENTO PELO ACIONAMENTO DO SISTEMA DE DEFESA ANTIOXIDANTE EM PLANTAS DE ALGODÃO.....	66
	RESUMO.....	66
5.1	Introdução.....	67
5.2	Material e Métodos.....	69
5.2.1	Área experimental, condições de cultivo e tratamentos.....	69
5.2.2	Manejo da irrigação.....	71
5.2.3	Área foliar, dados biométricos, massa fresca e seca, e tolerância relativa ao estresse.....	71
5.2.4	Teor relativo de água, suculência foliar e potencial osmótico.....	72
5.2.5	Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a.....	72
5.2.6	Pigmentos fotossintéticos.....	73
5.2.7	Teores de lignina.....	73
5.2.8	Peroxidação de lipídeos de membrana e peróxido de hidrogênio.....	74
5.2.9	Atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidante.....	74

5.2.10	Análise Estatística.....	75
5.3	Resultados.....	75
5.3.1	Ensaio de crescimento.....	75
5.3.1.1	<i>Dados biométricos.....</i>	75
5.3.1.2	<i>Biomassa.....</i>	76
5.3.2	Ensaio fisiológico.....	80
5.3.2.1	<i>Suculência foliar, teor relativo de água e potencial osmótico.....</i>	80
5.3.2.2	<i>Trocas gasosas.....</i>	81
5.3.2.3	<i>Fluorescência da clorofila a.....</i>	84
5.3.2.4	<i>Pigmentos fotossintéticos.....</i>	84
5.3.3	Ensaio bioquímico.....	87
5.3.3.1	Lignina.....	87
5.3.3.2	Enzimas antioxidantes, peroxidação lipídica e conteúdo de H ₂ O ₂	87
5.4	Discussão.....	90
5.4.1	O ácido salicílico exógeno alivia os danos do estresse sobre o crescimento da cultivar de algodão sensível ao déficit hídrico.....	90
5.4.2	Os agentes sinalizadores podem otimizar a eficiência fotossintética do algodoeiro sob restrição hídrica.....	91
5.4.3	O desempenho superior mediado por sinalizadores na cultivar de algodão sensível ao estresse é associado com maior o potencial antioxidante.....	93
5.5	Conclusão.....	94
5.6	Referências.....	94
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100

1 INTRODUÇÃO GERAL

As plantas estão sujeitas a diferentes influências do ambiente, sejam em condições naturais quanto em ambientes agrícolas, que podem resultar em estresse, ou seja, uma condição fisiológica alterada induzida por fatores que tendem a alterar o equilíbrio. Nesse contexto, o aumento da evapotranspiração das culturas e a redução da precipitação efetiva, devido a mudanças climáticas, contribuem para o déficit hídrico. Esse fator tem sido um desafio para a agricultura global, especialmente em regiões áridas e semiáridas (CHAUDHRY; JUNAID; GÖKÇE, 2021).

O déficit hídrico é definido como uma situação em que a planta perde mais água por transpiração do que absorve, por conseguinte, o potencial hídrico e o turgor da planta são reduzidos (LUO et al., 2017). A exposição a longos períodos de déficit hídrico pode ocasionar desbalanço nos processos de transportes de elétrons em diferentes compartimentos celulares e gerar um estresse oxidativo, caracterizado pelo aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), cujo acúmulo nos tecidos leva à toxicidade e resultar na morte celular (Kumar et al., 2017). O estresse oxidativo é desencadeado pelas EROs, como o radical superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxílico ($-OH$) e oxigênio singlete, as quais estão presentes na célula vegetal como subprodutos normais do metabolismo aeróbico e de processos fotooxidativos, sendo produzidas em diferentes compartimentos celulares (cloroplastos, mitocôndrias, membrana plasmática, peroxissomos) (VELLOSA et al., 2021).

No entanto, as plantas respondem bioquimicamente e molecularmente, desencadeando mecanismos de tolerância, que envolvem desde mudanças bioquímicas como soluções fisiológicas significativas. Dentre essas respostas, pode-se destacar o acúmulo de solutos compatíveis; que podem ser íons, açúcares, álcoois, polióis e aminoácidos e de proteínas específicas de choque osmótico, responsáveis pelo ajuste osmótico (ANJUM et al., 2017) e a capacidade de regulação da abertura estomática, contribuindo para a redução da transpiração e o aumento da eficiência do uso da água (CARVALHO et al., 2019).

Diante disso, as plantas apresentam um complexo sistema antioxidante para mitigar os efeitos deletérios das EROs e restaurar a homeostase redox. Esse sistema é constituído por componentes enzimáticos, como as enzimas dismutases do superóxido (SOD), catalases (CAT), peroxidase do ascorbato (APX), peroxidases (POX), e não enzimáticos como o ácido ascórbico (ASA), a glutathione (GSH), α -tocoferol e outras moléculas com poder antioxidante (SHARMA et al., 2019).

As respostas das plantas ao estresse hídrico são bastante complexas, tornando a tolerância ao estresse um processo dependente do efetivo acionamento dos mecanismos fisiológicos e bioquímicos. Nesse contexto, moléculas sinalizadoras como ácido salicílico, ácido jasmônico, brassinosteróides, glicina betaína, melatonina, poliaminas, prolina e H_2O_2 , são atualmente objeto de investigação como indutores das respostas de defesa, constituindo uma estratégia para aumento da tolerância das plantas ao estresse (KERCHEV et al., 2020).

Estudo com aplicações foliares de ácido salicílico, glicina betaína e prolina em plantas de algodão demonstraram efeitos positivos das moléculas nas respostas ao déficit hídrico, como melhorias nos parâmetros produtivos e de crescimento em relação as plantas não tratadas (NOREEN et al., 2015). Para os autores, o uso do ácido salicílico mostrou-se mais viável economicamente em relação a glicina betaina e prolina. O uso da melatonina também tem sido investigado com relação ao potencial mitigador dos efeitos do estresse por seca, através do acionamento de mecanismos como eliminação de EROs e fortalecimento do sistema antioxidante da planta, promovendo atenuação da inibição fotossintética e regulação dos fatores de transcrição em diversas espécies (Bozorov et al., 2018)

A produção de algodão (*Gossypium hirsutum* L.), sendo predominantemente realizada durante o verão, enfrenta desafios significativos devido às altas temperaturas e aos possíveis períodos de veranicos. Essas condições climáticas adversas têm o potencial de comprometer o crescimento e desenvolvimento saudável das plantas, afetando diretamente processos vitais como a fotossíntese e a expansão celular. Como resultado dessas adversidades, observam-se reduções na área foliar total, taxas de transpiração e acúmulo de matéria seca, bem como uma influência negativa na translocação eficiente de nutrientes, o que, por sua vez, pode resultar na diminuição do rendimento econômico (KHATTAK et al., 2021).

Os estádios reprodutivos do algodoeiro são particularmente sensíveis à escassez de água, podendo a estiagem comprometer a qualidade do produto final.

Isso se reflete no rendimento e na proporção da pluma, assim como na quantidade de óleo presente nos caroços. Além disso, características essenciais das fibras, como resistência e comprimento, também são impactadas negativamente. Isso resulta na produção de fibras de baixa qualidade, acarretando prejuízos econômicos substanciais, considerando que a remuneração das fibras está diretamente relacionada à sua qualidade intrínseca (BOZOROV et al., 2018).

Portanto, a utilização de indutores químicos emerge como uma estratégia promissora para fortalecer as defesas antioxidantes das plantas de algodão, melhorar a eficiência fotossintética e promover o crescimento vegetal. Além disso, esses indutores têm o potencial de aumentar o teor de água nos tecidos, preservando assim a qualidade das fibras e dos caroços. O presente estudo foi desenvolvido para testar a hipótese que a aplicação de agentes sinalizadores ativa respostas de defesa para melhorar o desempenho de cultivares contrastantes de *Gossypium hirsutum* L. sob condições de déficit hídrico. Espera-se que, com os dados obtidos, seja possível desenvolver estratégias de manejo que visem mitigar os efeitos adversos associados à baixa precipitação e à crescente demanda por água nas lavouras de algodão.

2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

Para testar a hipótese levantada, os ensaios foram realizados em duas etapas consecutivas e interdependentes. A primeira etapa foi conduzida em casa de vegetação, seguindo um delineamento experimental do tipo inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6×4 , com quatro repetições. O primeiro fator consistiu de seis variedades de algodão, selecionadas a partir de levantamentos bibliográficos, no tocante à frequência e área plantada na região do MATOPIBA na safra de 2020/2021. O segundo fator envolveu quatro lâminas de irrigação, representando 100, 80, 60 e 40% da capacidade de retenção de água (CRA) no solo. Ao final do experimento, foram avaliados parâmetros biométricos, biomassa, conteúdo de água, trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos, peroxidação lipídica e tolerância relativa ao estresse. A metodologia e os resultados detalhados são descritos no **capítulo 2**.

A segunda etapa, que teve como alvo avaliar três (03) moléculas *primers* com potencial de atenuação dos danos induzidos pelo estresse hídrico, foi conduzida em um delineamento com blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial $3 \times 4 \times 2$, com 4 repetições. O primeiro fator foi composto por três cultivares de algodão (FM 970 GLTP RM, FM 911 GLTP e FM 974 GL), o segundo por tratamentos com moléculas sinalizadoras [pulverização com água destilada (controle negativo), ácido salicílico, melatonina e peróxido de hidrogênio], enquanto o terceiro foi constituído por duas condições hídricas [controle bem irrigado (90% da capacidade de campo – CC) e déficit hídrico (50% da CC)] , previamente selecionadas através de análise de correlação dos dados do primeiro experimento. Ao final do experimento, foram investigados os parâmetros biométricos, fotossintéticos, conteúdo de pigmentos fotossintéticos, potencial osmótico, teor relativo de água, suculência foliar, tolerância relativa ao estresse, peroxidação lipídica, conteúdo de peróxido de hidrogênio e sistema de defesa enzimático. A descrição da metodologia e dos resultados está detalhada no **capítulo 3**.

3 CAPÍTULO 1

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Impactos do déficit hídrico em sistemas agrícolas sob a ótica da fisiologia vegetal

A água é a substância mais abundante da terra, sendo o meio para muitos processos bioquímicos cruciais para a atividade celular. Nas plantas, representa 95% da biomassa e, combinada com a temperatura, constitui os meios principais para crescimento e funcionamento vegetal. No entanto, também é considerado o elemento mais limitante (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2018).

A absorção da água pelas raízes das plantas pode ocorrer de três formas, via apoplasto, simplasto e através das membranas celulares, sendo que a entrada de água pelas raízes é dependente do gradiente de potencial hídrico entre as folhas e a atmosfera (SCHARWIES; DINNENY, 2019). Quando o ambiente exige alta transpiração ou quando há baixa disponibilidade hídrica no solo, a planta precisa absorver água de forma mais eficiente, caso contrário ocorrerá murchamento, podendo levar à morte do vegetal (GUPTA et al., 2020).

A deficiência hídrica resulta da combinação de baixas precipitações, escassa umidade no solo e elevadas temperaturas, sendo uma ocorrência presente em todas as regiões climáticas, causando estresse e perdas de produtividade nas plantas, cujo fato atualmente está fortemente associado ao aquecimento global. Estima-se que cerca de 20% do planeta seja afetado pela seca, incluindo os países da América do Sul. Essa condição resulta em reduções significativas, alcançando a 50% na produção, causando perdas econômicas diretas que variam de 6 a 8 bilhões de dólares (MARTIGNAGO et al., 2020).

Diante dessas condições adversas, a absorção de nutrientes é significativamente afetada, principalmente em regiões áridas e semiáridas do mundo, induzindo mudanças adaptativas nas plantas, incluindo alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas (CHTOUKI et al., 2022). Dentre as alterações

morfofisiológicas induzidas pela restrição hídrica na planta, podemos citar a diminuição da área foliar, regulação de abertura e fechamento estomático, aceleração da senescência, abscisão foliar, liberação de prótons e elétrons durante a fase fotoquímica da fotossíntese e perda da turgência celular, que estão diretamente relacionadas com a sustentação das plantas, o alongamento celular, as trocas gasosas e o transporte de assimilados no floema (Gupta et al., 2020).

Bioquimicamente, o déficit hídrico afeta o metabolismo dos carboidratos, proteínas, aminoácidos e outros metabólitos (OZTURK et al., 2020). Para sobreviver em condições desfavoráveis, a planta reajusta seu metabolismo e fisiologia, acumulando N-aminossolúveis e carboidratos solúveis promovendo o ajuste osmótico que se relaciona com o metabolismo de carboidratos, a capacidade fotossintética e a respiração (GAUR et al, 2021). O aumento nas concentrações de prolina é muito característico em plantas estressadas pela seca, devido ao papel dessa molécula como osmorregulador, estabilizador de membranas e eliminador de EROs (ZULFIQAR; ASHRAF, 2023).

O déficit hídrico acontece em três fases uma de resposta ou reação, em que a planta sai da sua condição normal, perdendo estabilidade de suas estruturas de membrana e funções vitais de produção de energia, resultando em uma maior atividade catabólica. Com o prolongamento do estresse, a planta entra na fase de restrição ou resistência, levando a aclimação através de reparos proteicos e síntese de substâncias de proteção. Já na fase final ou estágio de exaustão, o estresse, intensificado e contínuo, faz com que a planta diminua suas defesas, proporcionando espaço para infecções oportunistas e levando à morte dos tecidos (KADAMBOT; SIDDIQUE, 2020).

Quando as plantas detectam sinais de estresse por seca, ocorre uma transdução de sinal que leva à indução de processos fisiológicos e metabólicos, que associados à mudança na expressão gênica, podem resultar na aclimação ou susceptibilidade ao estresse hídrico. A adaptação ao estresse acontece no nível de expressão gênica, embora seja menos bem caracterizado do que os processos fisiológicos (DEVITT; CHUNG; SCHENK, 2022).

Como uma consequência secundária ao desbalanço do metabolismo induzido pelo estresse hídrico, as plantas enfrentam o estresse oxidativo, caracterizado pelo aumento na produção e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), que têm efeitos prejudiciais no crescimento e na fotossíntese, levando a danos celulares e,

em casos mais graves, à morte celular programada (OMIDBAKHSHFARD et al., 2020). As EROs são subprodutos da atividade redox das células, manifestando-se como radicais livres ou moléculas não radicais, sendo formadas a partir de um estado de excitação do oxigênio molecular, formando o oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$), ou de sucessivas adições de elétrons ao oxigênio, reduzindo-o ao radical aniônico superóxido (O_2^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($\text{OH}^\cdot$) (VELLOSA et al., 2021).

Em contrapartida ao estresse oxidativo, as plantas apresentam um complexo sistema de defesa antioxidante, constituído por componentes enzimáticos e não-enzimáticos capazes de manter a homeostase redox. O sistema enzimático é composto, principalmente, pelas enzimas dismutases do superóxido (SOD), catalases (CAT), peroxidase do ascorbato (APX), peroxidase do guaiacol (G-POD) e outras peroxidases (POX); enquanto no sistema antioxidante não-enzimático são encontradas moléculas capazes de neutralizar as EROs, como o ácido ascórbico (ASA), a glutathiona (GSH), α -tocoferol, carotenoides, entre outras (SHARMA et al., 2019).

Diante da perspectiva do aumento populacional e da crescente demanda por alimentos no panorama atual e futuro de aumento de temperatura global e interferências nos níveis pluviométricos, diversos estudos têm se dedicado à seleção de plantas tolerantes ao estresse hídrico, bem como estratégias capazes de atenuar os enormes impactos morfológicos, fisiológicos, bioquímicos, genéticos, que a seca gera nas plantas. Portanto, a identificação de potenciais indutores dessas respostas de defesa torna-se um importante alvo nos estudos de fisiologia vegetal, biologia celular e molecular, bem como nos programas de melhoramento genético.

3.2 Sinalizadores de tolerância ao estresse hídrico

Diante dos desafios crescentes enfrentados na agricultura pelos períodos de estiagens cada vez mais frequentes, muitos estudos têm se concentrado no desenvolvimento de estratégias que diminuam os riscos relacionados à limitação hídrica. Entre essas abordagens, destacam-se o melhoramento convencional, a biotecnologia de plantas transgênicas, a seleção assistida por marcadores

moleculares, a aplicação exógena de hormônios, osmoprotetores e estratégias aprimoradas para o uso eficiente da água de irrigação (MA et al., 2022). Mais recentemente, vem se destacando a aplicação de moléculas *primer* biologicamente ativas (brassinosteróides, alantoína, melatonina, poliaminas, H_2O_2), que sejam capazes de ativar mecanismos de defesa ao estresse (OMIDBAKHSHFARD et al., 2020).

3.2.1 Melatonina como molécula *primer*

A melatonina (*N*-acetil-5-metoxitriptamina) foi descoberta em 1958 em glândulas pineal bovina e desempenha funções celulares e fisiológicas em diversos reinos. Em animais, ela desempenha um papel importante em eventos como ritmo circadiano, sono, humor, temperatura corporal, apetite, comportamento sexual, fisiologia da retina, sistema imunológico, entre outros (SHARIF et al., 2018). Os estudos iniciais sobre a fitomelatonina iniciaram-se em 1995, por conta da semelhança estrutural com a auxina. Desde então, a melatonina tem demonstrado ser uma molécula versátil em plantas, desempenhando múltiplas funções, incluindo ação antioxidante para o controle de EROs, como estabilizador e protetor de membranas celulares, especialmente das mitocondriais, (ARNAOA; HERNANDEZ-RUIZ, 2019).

Estudos indicam que a aplicação exógena da melatonina retarda a floração e a senescência das folhas, além de promover a regeneração de raízes laterais e proteger as plantas de estresses abióticos, aumentando seu potencial de recuperação, ao envolver ajustes na fotorrespiração, e no metabolismo de carboidratos e nitrogênio em várias culturas (KHATTAK et al., 2022). Os autores destacam que a melatonina melhorou a degradação da sacarose, as trocas gasosas e promoveu melhor arranjo de folhas e capulhos, além de melhorar parâmetros produtivos quando aplicada no início da floração do algodão submetido ao déficit hídrico (KHATTAK et al., 2022).

O pré-tratamento com melatonina em sementes de diferentes variedades de algodão tolerantes e sensíveis à seca teve papel fundamental na rustificação da variedade sensível, melhorando sua defesa antioxidante enzimática e não

enzimática, bem como aumentando a atividade fotossintética, a eficiência no uso da água, o metabolismo do nitrogênio e a maior expressão de genes relacionados à tolerância à seca; como os das famílias DREB, bZIP, LEA e de aquaporinas (SUPRIYA et al., 2022). De forma semelhante, Hashem et al. (2021) verificaram o efeito da melatonina exógena no aumento da tolerância à salinidade em plantas de algodão, as quais apresentaram melhor performance fotossintética, reduções nos danos oxidativos, melhores parâmetros de crescimento e regulação da expressão de genes responsivos ao estresse e a canais iônicos, em relação àquelas plantas estressadas que não receberam o pré-tratamento. Segundo Zhang (2023), a inibição de genes relacionados com a biossíntese de melatonina resultou na maior sensibilidade de plantas de algodão ao estresse salino, sendo esse efeito revertido através da aplicação exógena do primer, que melhorou a ativação dos mecanismos de defesa nas plantas.

Portanto, a melatonina pode atuar de forma benéfica em diversas funções na fisiologia vegetal, e por esse motivo, desde os primeiros estudos, vem se enquadrando cada vez mais nos critérios para se enquadrar como fitohormônio vegetal. Tal comprovação só foi bem estabelecida a partir da descoberta e identificação de receptores CAND2/PMTR1 de fitomelatonina em *Arabidopsis thaliana*, localizados na membrana plasmática (WEI et al., 2018).

3.2.2 Peróxido de hidrogênio (H₂O₂) como agente sinalizador

Dentre as EROs, o peróxido de hidrogênio (H₂O₂) destaca-se por ser um oxidante relativamente estável e neutralidade de carga, o que facilita sua passagem através da bicamada lipídica da membrana celular. Com essa característica e a molécula se difunde-se rapidamente através da membrana celular e atue como um sinalizador em baixas concentrações, favorecendo uma rápida resposta nas plantas, em alta concentração, está relacionado ao estresse oxidativo, podendo conduzir para a morte celular programada (MITTLER, 2017; NAZIR et al., 2020).

Quando as plantas sofrem algum estresse, abiótico ou biótico, os principais pontos de produção das EROs são os cloroplastos e as mitocôndrias, organelas que exibem alta atividade de oxidação metabólica ou apresentam um intenso fluxo de

elétrons (SINGH et al., 2019). Além disso, a fotorrespiração é outra forma de produção de H_2O_2 , nos peroxisomos como também há sítios de produção na membrana plasmática e no apoplasto (SINGH et al., 2019).

O peróxido de hidrogênio é umas das espécies reativas de oxigênio que apresentam uma meia-vida relativamente longa, desempenhando dois papéis nas plantas: em baixa concentração agem como uma molécula sinalizadora envolvida na aclimação a vários estresses bióticos e abióticos; e

Beneficiando-se da característica do H_2O_2 como agente sinalizador de estresses abióticos, estudos vêm sendo conduzidos com a aplicação exógena em diferentes culturas como estratégia para mitigar os danos provocados pelo estresse. Araújo et al. (2021) reportam que a aplicação de H_2O_2 em plantas de milho (*Zea mays*) cultivadas sob salinidade, resultou em melhorias no desempenho fotossintético, preservando a estrutura dos tilacóides, bem como modulou metabólitos chave (sorbitol, glicose, asparagina e tirosina), contribuindo para a manutenção do equilíbrio osmótico e redução do estresse oxidativo.

Silva et al. (2022) observaram que plantas de gravioleira (*Annona muricata* L.) tratadas com aplicação foliar de H_2O_2 apresentaram aumento significativo no crescimento, na síntese de clorofila e no teor relativo de água nas folhas, promovendo, conseqüentemente, redução no déficit de saturação hídrica foliar causado pela água salina. Em mudas de maracujazeiro amarelo (*Passiflora edulis* Sims F.), concentrações de H_2O_2 entre 10 e 30 μ M induziram a aclimação das plantas ao estresse salino, mitigando os efeitos deletérios da salinidade sobre a taxa de crescimento relativo em diâmetro de caule e área foliar, condutância estomática, transpiração, taxa de assimilação de CO_2 e eficiência instantânea da carboxilação da rubisco (SILVA et al., 2021). Além disso, foram relatados efeitos positivos do pré-tratamento com H_2O_2 na produtividade de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) exposta ao déficit hídrico (JIRA-ANUNKUL E PATTANAGUL, 2021). Os autores verificaram que a aplicação de H_2O_2 , tanto em sementes quanto nas folhas, resultou em melhorias significativas nos parâmetros produtivos, incluindo o número de perfilhos, número de panículas, número de grãos cheios, peso de grãos cheios e índice de colheita, em comparação com as plantas não tratadas.

3.2.3 Ácido salicílico como mitigador do déficit hídrico

O ácido salicílico (AS) é um fitohormônio de molécula pequena naturalmente presentes nas plantas. Ele desempenha um papel fundamental na defesa imunológica das plantas, atuando como sinalizador para desencadear respostas fisiológicas e bioquímicas que contribuem para a tolerância a estresses bióticos e abióticos (WANI et al., 2017). Esse fitohormônio faz parte de uma categoria de substâncias conhecidas como salicilatos, que são compostos fenólicos produzidos pelas plantas. Esses compostos dispõem de uma estrutura molecular que inclui um anel aromático e um grupo hidroxila (MARURI-LÓPEZ et al., 2019).

No metabolismo vegetal, é comprovado que o ácido salicílico desempenha papéis vitais na tolerância das plantas ao estresse, cujo principais efeitos incluem a ativação dos mecanismos de defesa das plantas, melhoria da fotossíntese, regulação do crescimento e desenvolvimento normal das plantas, bem como o aumento da tolerância a diversas formas de estresse, como seca, frio, calor, salinidade e tensões causadas por metais pesados (SONG et al., 2023).

Evidências apontam que esse composto possui a capacidade de regular o crescimento das plantas, desempenhando papel essencial em diversos processos fisiológicos dos vegetais. Com a presença do ácido salicílico, as plantas ativam uma série de mecanismos de defesa e aclimação, permitindo-lhes sobreviver e manter seu crescimento mesmo em condições de estresse abiótico (KAYA et al., 2020).

Além disso, AS é caracterizado como um agente antioxidante, vinculado à indução de respostas de defesa nas plantas diante de condições de estresse tanto biótico quanto abiótico, desempenhando também um papel significativo no metabolismo do nitrogênio e da prolina, na síntese de glicina betaína, no fortalecimento do sistema de defesa antioxidante e na regulação da relação entre água, planta e atmosfera (ROCHA et al., 2022).

De modo geral o ácido salicílico quando pulverizado proporciona às plantas aumentos nas taxas fotossintéticas, manutenção do conteúdo de água nos tecidos vegetais e diminuição da transpiração, aumento de prolina livre e aumento da atividade de enzimas antioxidantes (BARROS et al., 2019). Além disso, o pré-tratamento com AS efetivamente elimina o acúmulo de O_2^- provenientes dos efeitos

da seca, junto a regulação da transcrição regulando positivamente dos genes associados ao equilíbrio redox das células Samanta, seth, roychoudhury, 2023).

Vários estudos comprovam a eficiência no uso do ácido salicílico como mitigador de estresses abióticos. Por exemplo, foi relatado que o preparo de sementes de trigo com 50 μM de ácido salicílico aumentou a tolerância ao estresse hídrico, regulando positivamente a defesa antioxidante e os sistemas de glicoxalase, que garantiram assim um melhor estabelecimento de mudas de trigo (ALAM et al., 2022) aumento dos níveis de aminoácidos em plantas cítricas (BALFAGÓN et al., 2022). Regulação da abertura estomática através da via reativa do oxigênio OsWRKY45 em plantas de arroz (XU et al., 2023), aumentando o conteúdo de glicina betaína, proteína solúvel total, carboidratos, clorofilas, carotenóides, flavonóides e antocianinas em plantas de cártamo (SHAKI et al., 2018).

3.3 A cultura do algodoeiro

3.3.1 Origem e aspectos morfológicos

O algodão (*Gossypium* spp.) é a única cultura agrícola que tem quatro espécies domesticadas de forma independente em quatro regiões diferentes do mundo, sendo duas tetraplóides (*G. hirsutum* L. na Mesoamérica, *G. barbadense* L. na América do Sul), e dois diplóides (*G. herbaceum* L. na Arábia e na Síria e *G. arboreum* L. no Vale do Indo na Índia e no Paquistão) (WENDEL; BRUBAKER; SEELENAN, 2010; HU et al., 2019). Pertencendo à família Malvaceae e ao gênero *Gossypium*, o algodoeiro abrange mais de 50 espécies e é cultivado principalmente por suas valiosas fibras naturais e sementes oleaginosas (SEKLOKA et al., 2018).

São plantas anuais ou perene, o algodoeiro apresenta altura variando de 0,5 a 2 metros, dependendo da espécie e do ambiente de cultivo. Além disso, possuem folhas grandes, lobadas ou palmadas, com pelos glandulares e não glandulares. As flores do algodoeiro são isoladas e hermafroditas, com cálice composto por cinco sépalas e corola com cinco pétalas, geralmente brancas ou amareladas. O fruto é uma cápsula espinhosa que abriga sementes envoltas em fibras de algodão.

A espécie de algodão mais amplamente cultivada no mundo é o *Gossypium hirsutum* L., conhecido como algodão herbáceo, sendo responsável por fornecer mais de 90% da produção mundial de algodão. As principais regiões produtoras incluem os Estados Unidos, China, Índia, Paquistão, Brasil e países da África. Esses países desempenham um papel crucial no fornecimento de fibras para a indústria têxtil no mundo (KHAN et al., 2020).

3.3.2 Histórico da cotonicultura no Brasil

Relatos afirmam que o algodão foi domesticado a aproximadamente 4000 anos no sul da Arábia, no entanto civilizações antigas, como os Incas, já utilizavam a fibra a 4500 anos a.C. Os árabes foram os responsáveis pela comercialização do algodão no continente europeu, sendo estes ainda os primeiros a fabricarem tecidos e papel a partir da fibra, justificando a origem do nome que deriva da palavra árabe *Al-qutum* (AMPA, 2022).

No Brasil os nativos já cultivavam e faziam uso da fibra de algodão, antes mesmo da colonização, sendo a cultura posteriormente, a cultura foi incentivada na colônia portuguesa. Em 1619 na província do Ceará, Martim Soares, o então governador, foi orientado a cultivar algodoeiros na região, destinados principalmente à confecção de tecidos para os escravos. Seu cultivo era em pequenas áreas, que logo foi prejudicado devido às invasões holandesas que quebraram a economia de 1624 a 1654 e desorganizaram o sistema produtivo no Nordeste (COSTA; BUENO, 2004). Os principais marcos históricos relacionados à cultura do algodão no Brasil encontram-se listados na Tabela 1.

Com os cultivos agora concentrados nas regiões de Cerrado, uma nova forma organizacional surgiu com a criação da Associação Brasileira de Produtores de Algodão (ABRAPA) em 1999, que desempenhou um papel crucial na formação de associações estaduais, facilitando a implementação de ações políticas, administrativas e operacionais, bem como na integração dos produtores. Em 2006, no Piauí, foi fundada a Associação Piauiense de Produtores de algodão (Apipa), a qual permitiu a autossuficiência do mercado interno (RODRIGUES, 2015).

Atualmente, a produção de algodão está concentrada nos estados do Mato Grosso, maior produtor, além de Goiás e Mato Grosso do Sul. Na região Nordeste, os estados do Maranhão, Piauí e Bahia, juntamente com o estado do Tocantins, compõem o cinturão produtivo conhecido como MATOPIBA, adotando níveis tecnológicos comparáveis aos utilizados no Centro-Oeste (Richetti, 2017). Em contrapartida, os demais estados, como Sergipe, Alagoas, Ceará, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, produzem algodão com baixo nível tecnológico, atendendo a nichos específicos (RICHETTI, 2017).

Tabela 1 - Principais datas ligadas a eventos marcantes da cotonicultura brasileira.

Fonte: Adaptado de Costa e Bueno (2004).

Datas	Principais eventos
1654- 1750	Maranhão se consolida como maior produtor, exportando a fibra para a Inglaterra.
1750	O governador português incentiva o aumento da produção no Brasil para reduzir a dependência dos tecidos Ingleses.
1753 e 1758	Criação de duas companhias de comércio para cooperar no transporte do algodão
1760	Exportação de 130 sacas do Maranhão para a Europa
1817	Plantava-se algodão em São Paulo, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo e em praticamente todo o Nordeste.
1830	Maranhão exportava para a Europa 69 mil sacas
1861-1865	Complicações na exportação de algodão, decorrente da Guerra Civil Americana
1881-1882	Produção algodoeira chegou a 16.482 toneladas
1888	Produção de 504 toneladas, consequência da desorganização da agricultura brasileira, devido a abolição da escravidão
1914- 1918	Exportações de algodão prejudicadas por causa da 1ª Guerra mundial.
1915	Criação no Ministério da Agricultura o Serviço do Algodão
1920	Aproveitamento industrial do caroço do algodão
1924	Instituto Agrônomo de Campinas trabalha no melhoramento da cultura
1930	Estado de São Paulo assume como maior produtor nacional da cultura
1939 – 1945	Exportações prejudicadas devido a 2ª Guerra Mundial
1968	Brasil se consolida como 5º maior produtor de algodão do mundo
1975	Embrapa dá seguimento em programas de melhoramento genético do algodão
1980	Redução drástica da produção e área plantada por causa do bicudo do algodoeiro
Década de 90	Recuperação gradual da cotonicultura brasileira, marcado pelo cultivo nas regiões de cerrado.

3.3.3 Cenário atual da produção de algodão

Atualmente, o Brasil se destaca com um dos cinco maiores produtores de algodão no mundo, ficando atrás apenas da China, Índia, EUA e Paquistão. Além disso, o país figura também entre os principais importadores globais, sendo reconhecido pela maior produtividade em regime de sequeiro (ABRAPA, 2022).

Na safra de 2022/23, em nível global, foram registradas reduções na área plantada, principalmente devido ao aumento do custo de produção associado ao fornecimento de fertilizantes, influenciados pela guerra Rússia e Ucrânia (USDA, 2022). No território Brasileiro, a produção de algodão atingiu 3.150 milhões de toneladas, refletindo um crescimento substancial de 23,3% em relação à safra anterior. Esse aumento expressivo acompanhou o aumento da área plantada (4%), que totalizou 1.663 milhões de hectares, registrando uma produtividade recorde de 1.893 kg ha⁻¹ de algodão descaroçado (CONAB 2023a). Para a safra 2023/2024, a projeção indica um aumento de 4,2% na área plantada, alcançando um total de 1.733 milhões de hectares.

A prospecção atual é que a demanda global por algodão seja crescente, principalmente porque o mercado ainda se recupera das interrupções devido aos bloqueios e paralisações da indústria têxtil durante a pandemia e crescente aumento populacional (USDA, 2022).

3.3.4 Impactos do déficit hídrico na cultura do algodão

Quando comparado com outras culturas, o algodão apresenta maior tolerância à seca principalmente por apresentar características morfológicas e fisiológicas que favorecem a aclimação (OZTURK et al., 2021). Porém, essa maior resistência não significa necessariamente que a cultura não tenha perdas de produção, sendo de grande importância a busca por métodos que diminuam os impactos do déficit hídrico na cultura, procurando manter a qualidade do produto final.

O cultivo do algodão ocorre geralmente no verão, uma estação marcada por altas temperaturas e períodos de veranicos que podem afetar o crescimento e desenvolvimento da planta. A exposição ao déficit hídrico, em qualquer estágio fenológico da cultura, afeta processos metabólicos importantes, como fotossíntese, transpiração, expansão celular, área foliar e acúmulo de biomassa (KHATTAK et al., 2022). Em plantas de algodão sob escassez hídrica, a atividade fotossintética reduzida resulta em menor síntese de fotoassimilados, enquanto os ativos armazenados são esgotados devido à respiração contínua; assim, ocorre um desequilíbrio entre o acúmulo de fotoassimilados e sua degradação pela respiração, resultando em na translocação e redução do rendimento econômico (KHATTAK et al., 2021).

A cultura torna-se mais suscetível a baixa disponibilidade de água principalmente nos estádios de botão floral, floração e formação de maçãs (GAO et al., 2018). Nessas fases, períodos de estiagem podem comprometer a qualidade da fibra, interferindo no rendimento e percentagem da pluma e algumas características tecnológicas da fibra, tais como comprimento, uniformidade, índice de fibras curtas, resistência, alongamento à ruptura, índice micronaire e maturidade (GAO et al., 2018).

Sendo de grande importância mundial no fornecimento de fibras e óleo, a cultura do algodoeiro está sujeita a condições ambientais como o déficit hídrico que compromete o crescimento e produção normal através de diferentes perturbações. O uso de moléculas bioativas fornecidas de forma exógena pode ser uma importante estratégia de aclimação para a planta suportar a condição estressante.

3.4 Referências

ABRAPA - Associação Brasileira de Produtores de Algodão. (2022). **Algodão no Brasil**. Disponível em: <<https://www.abrapa.com.br/Paginas/dados/Algod%C3%A3o%20no%20Brasil.asp>>. Acesso em 01 de julho de 2022.

ALAM, A; ULLAH, H.; THUENPROM, N.; TISARUM, R.; CHA-UM, S.; DATTA, A. Seed priming with salicylic acid enhances growth, physiological traits, fruit yield, and

quality parameters of cantaloupe under water-deficit stress. **South African Journal of Botany**, v. 150, p. 1-12. 2022.

ALMEIDA, E.; PEREIRA, J. R.; AZEVEDO, C. A. V.; ARAÚJO, W. P.; ZONTA, J. H.; CORDÃO, M. A. Algodoeiro herbáceo submetido a déficit hídrico: produção. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n.1, p.22-28, 2017.

AMPA - Associação Mato-Grossense de Produtores de Algodão. (2022). **História do algodão**. Disponível em: <<https://ampa.com.br/historia-do-algodao/>>. Acesso em 13 de junho de 2022.

ANJUM, S. A.; ASHRAF, U.; TANVEER, M.; KHAN, I.; HUSSAIN, S.; WANG, L. Drought tolerance in three maize cultivars is related to differential osmolyte accumulation, antioxidant defense system, and oxidative damage. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 23373, 2017.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. A.; GOMES, F. T.; DA SILVA, M. J.; DA ROSA, A. M. F.; SIMÕES, V. J. L. P.; IZIDRO, J. L. P. S.; LEITE, M. L. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. **Pubvet**, v. 13, p. 148, 2018.

ARAÚJO, G. S.; MARINHO, S. O. P.; PINHEIRO, S. K. P.; CASTRO, M. E.; LOPES, L. S.; MARQUES, E. C.; CARVALHO, H. H.; GOMES-FILHO, E. H₂O₂ priming promotes salt tolerance in maize by protecting chloroplasts ultrastructure and primary metabolites modulation. **Plant Science**, v. 303, p. 110774, 2021.

ARNAO, M. B.; HERNÁNDEZ-RUIZ, J. Melatonin: a new plant hormone and/or a plant master regulator? **Trends in Plant Science**, v. 24, n. 1, p. 38-48, 2019.

BALFAGÓN, D.; RAMBLA, J.; GRANELL, A.; ARBONA, V.; GOMEZ-CADENAS, A. Grafting improves tolerance to combined drought and heat stresses by modifying metabolism in citrus scion. **Environmental and Experimental Botany**, v. 195, p. 104793, 2022.

CARVALHO, M.; CASTRO, I.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; CORREIA, C.; EGEEA-CORTINES, M.; MATOS, M.; ROSA, E.; CARNIDE, V.; LINO-NETO, T. Evaluating stress responses in cowpea under drought stress. **Journal of Plant Physiology**, v. 241, p. 153001, 2019.

CHAUDHRY, U. K.; JUNAID, M. D.; GÖKÇE, A. F. Influence of environmental adversities on physiological changes in plants. **Developing Climate-Resilient Crops**, p. 85-110, 2021.

CHTOUKI, M.; LAAZIZ, F.; NACIRI, R.; GARRÉ, S.; NGUYEN, F.; OUKARROUM, A. Interactive effect of soil moisture content and phosphorus fertilizer form on chickpea growth, photosynthesis, and nutrient uptake. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 6671, 2022.

CONAB a. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: décimo segundo levantamento, setembro 2023, v. 10, safra 2022/2023. Brasília. 2023.

CONAB b. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: segundo levantamento, novembro 2023, v. 11, safra 2023/2024. Brasília. 2023.

COSTA, S. R.; BUENO, M. G. **A saga do algodão: das primeiras lavouras à ação na OMC**. Brasília: ABRAPA/Rio de Janeiro: Insight Engenharia, 2004.

DEVITT, J.; CHUNG, A.; SCHENK, J. J. Inferring the genetic responses to acute drought stress across an ecological gradient. **Genomics**, v. 23, n. 1, p. 1-23, 2022.

GAO, M.; SNIDER, J.; BAI, H.; HU, W.; WANG, R.; MENG, Y.; WANG, Y.; CHEN, B.; ZHOU, Z. Drought effects on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) fibre quality and fibre sucrose metabolism during the flowering and boll-formation period. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 206, n. 3, p. 309-321, 2020.

GAUR, A.; SHARMA, D.; SHEORAN, S.; CHAHAL, S.; CHAUDHARY, K.; SINGH, G.; SINGH, G. P. Role of water soluble carbohydrates in improving drought stress tolerance in wheat: An overview. **Journal of Cereal Research**, v. 14, p. 1-16, 2021.

GUPTA, A.; RICO-MEDINA, A.; CAÑO-DELGADO, A. The physiology of plant responses to drought. **Science**, v. 368, n. 6488, p. 266-269, 2020.

HASHEM, M. H.; HUSSEIN, H. T. Response of two cotton cultivars (*Gossypium hirsutum* L.) to spraying with proline acid under water stress condition. **Plant Archives**, v. 20, p. 523-534, 2020.

HU, Y.; CHEN, J.; FANG, L.; ZHANG, Z.; MA, W.; NIU, Y.; JU, L.; DENG, J.; ZHAO, T.; LIAN, J. *Gossypium barbadense* and *Gossypium hirsutum* genomes provide insights into the origin and evolution of allotetraploid cotton. **Nature Genetics**, v. 51, n. 4, p. 739-748, 2019.

JIRA-ANUNKUL, W.; PATTANAGUL, W. Effects of hydrogen peroxide application on agronomic traits of rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress. **Plant, Soil and Environment**, v. 67, n. 4, p.221-229, 2021.

KADAMBOT, H. M.; SIDDIQUE, B. H. Fresh water and watersheds. In: SIDDIQUE, K. H. M.; HELEN, B. **Water deficits: development**, 2020. p. 215-219.

KAYA, C.; ASHRAF, M.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. The role of endogenous nitric oxide in salicylic acid-induced up-regulation of ascorbate-glutathione cycle involved in salinity tolerance of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 147, p. 10-20, 2020.

KHAN, M. A.; WAHID, A.; AHMAD, M.; TAHIR, M. T.; AHMED, M.; AHMAD, S.; HASANUZZAMAN, M. World cotton production and consumption: An overview.

Cotton production and uses: Agronomy, crop protection, and postharvest technologies, p. 1-7, 2020.

KHATTAK, W. A.; HE, J.; ABDALMEGEED, D.; HU, W.; WANG, Y.; ZHOU, Z. Foliar melatonin stimulates cotton boll distribution characteristics by modifying leaf sugar metabolism and antioxidant activities during drought conditions. **Physiologia Plantarum**, v. 174, n. 1, p. e13526, 2022.

KUMAR, D.; AL HASSAN, M.; NARANJO, M.; AGRAWAL, V.; BOSCAIU, M.; VICENTE, O. Effects of salinity and drought on growth, ionic relations, compatible solutes and activation of antioxidant systems in oleander (*Nerium oleander* L.). **Plos One**, v. 12, n. 9, p. 0185017, 2017.

LIU, S.; QIN, F. Genetic dissection of maize drought tolerance for trait improvement. **Molecular Breeding**, v. 41, p. 1-13, jan.2021.

LUO, X.; WERE, P.; HOU, Z.; GOU, Y. Determination of shale osmotic pressure using spontaneous potential log. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 1, p. 19, 2017.

MA, H.; LI, P.; LIU, X.; LI, C.; ZHANG, S.; WANG, X.; TAO, X. Poly-γ-glutamic acid enhanced the drought resistance of maize by improving photosynthesis and affecting the rhizosphere microbial community. **Plant Biology**, v. 22, n. 1, p. 1-15, 2022.

MARTIGNAGO, D.; RICO-MEDINA, A.; BLASCO-ESCÁMEZ, D.; FONTANET-MANZANEQUE, J.; CAÑO-DELGADO, A. Drought resistance by engineering plant tissue-specific responses. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1676, 2020.

MARURI-LÓPEZ, I.; AVILES-BALTAZAR, N. Y.; BUCHALA, A.; SERRANO, M. Intra and extracellular journey of the phytohormone salicylic acid. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 423, 2019.

MITTLER, R. ROS are good. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 1, p. 11-19, 2017.

NAZIR, F.; FARIDUDDIN, Q.; KHAN, T. A. Hydrogen peroxide as a signalling molecule in plants and its crosstalk with other plant growth regulators under heavy metal stress. **Chemosphere**, v. 252, p. 126486, 2020.

NOREEN, S.; ZAFAR, Z. U.; HUSSAIN, K.; ATHAR, H. U. R.; ASHRAF, M. Assessment of economic benefits of foliarly applied osmoprotectants in alleviating the adverse effects of water stress on growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Pakistan Journal of Botany**, v. 47, p. 2223-2230, 2015.

OMIDBAKHSHFARD, M. A.; SUJEETH, N.; GUPTA, S.; OMRANIAN, N.; GUINAN, K.; BROTMAN, Y.; NIKOLOSKE, Z.; FERNIE, A.; MUELLER-ROEBER, B.; GECHEV, T. A biostimulant obtained from the seaweed *Ascophyllum nodosum* protects *Arabidopsis thaliana* from severe oxidative stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 2, p. 474, 2020.

OZTURK, M.; TURKYILMAZ UNAL, B.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; KHURSHEED, A.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1321-1335, 2021.

RICHETTI, A. Importância Econômica. In: Araujo, A. E. **Cultura do Algodão no Cerrado**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Algodão, 2017. p. 438.

ROCHA, M. E. L.; SOUZA, F. L. B.; COUTINHO, P. W. R.; MALAVASI, M. de M.; MALAVASI, U. C. Morphophysiological changes in seedlings of two wood species after application of salicylic acid. **Revista Ceres**, v. 69, p. 158-166, 2022.

RODRIGUES, J. C. J. Algodão no Brasil: mudança, associativismo e crescimento. In: FREIRE, E. C. **Algodão no Cerrado do Brasil**. 3 ed. Brasília, DF: Gráfica e Editora Positivo, 2015. p. 21-38.

SAMANTA, S.; SETH, C. S.; ROYCHOUDHURY, A. The molecular paradigm of ROS and RNS with different phytohormone signaling during drought stress in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, p. 108259, 2023.

SCHARWIES, J. D.; DINNENY, J. R. Water transport, perception, and response in plants. **Journal of Plant Research**, v. 132, p. 311-324, 2019.

SEKLOKA, E.; SABI, A. K.; ZINSOU, V. A.; ABOUDOU, A.; NDOGBE, C. K.; AFOUDA, L.; Lamine, B. M. Phenological, morphological and agronomic characterization of sixteen genotypes of cotton plant (*Gossypium hirsutum* L.) in rainfed condition in Benin. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**, v. 10, n. 2, p. 33-40, 2018.

SHAKI, F.; MABOUD, H. E.; NIKNAM, V. Increased growth and salt tolerance of safflower (*Carthamus tinctorius* L.), by salicylic acid. **Current Plant Biology**, v. 16-22, 2018.

SHARIF, R.; XIE, C.; ZHANG, H.; ARNAO, M. B.; ALI, M.; ALI, Q.; LI, Y. Melatonin and its effects on plant systems. **Molecules**, v. 23, n. 9, p. 2352, 2018.

SHARMA, P.; SHARMA, P.; ARORA, P.; VERMA, V.; KHANNA, K.; SAINI, P.; BHARDWAJ, R. Role and regulation of ROS and antioxidants as signaling molecules in response to abiotic stresses. In: IQBAL, M.; KHAN, R.; REDDY, P. S.; FERRANTE, A.; KHAN, N. A. **Plant Signaling Molecules**: Woodhead Publishing, 2019, p. 141-156.

SILVA, A. A. R.; CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; ARRUDA, T. F. L.; SOUZA, A. R.; SOARES, L. A. A. Peróxido de hidrogênio na atenuação do estresse salino nos indicadores fisiológicos e crescimento da graviroleira. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, 2022.

SILVA, A.; VELOSO, L.; LIMA, G.; AZEVEDO, C.; GHEYI, H.; FERNANDES, P. Hydrogen peroxide in the acclimation of yellow passion fruit seedlings to salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, p. 116-123, 2021.

SINGH, A.; KUMAR, A.; YADAV, S.; SINGH, I. K. Reactive oxygen species-mediated signaling during abiotic stress. **Plant Gene**, v. 18, p. 100173, 2019.

SONG, W.; SHAO, H.; ZHENG, A.; ZHAO, L.; XU, Y. Advances in the roles of salicylic acid in plant tolerance responses to biotic and abiotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 19, p. 3475, 2023.

SUPRIYA, L.; DURGESHWAR, P.; MUTHAMILARASAN, M.; PADMAJA, G. Melatonin mediated differential regulation of drought tolerance in sensitive and tolerant varieties of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 821353, 2022.

USDA - United States Department Agriculture. (2022). **Cotton and products annual 2022**. Disponível em: <<https://usdabrazil.org.br/>>. Acesso em 04 de julho de 2022.

VELLOSA, J. C. R.; BIAVATTI, M.; FRANÇÓIA, P. C. O.; MELLO, B. J.; ALMEIDA, A. C.; BUENO, G. E. Oxidative stress: an introduction to the state of the art. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 10152-10168, 2021.

WANI, A. B.; CHADAR, H.; WANI, A. H.; SINGH, S.; UPADHYAY, N. Salicylic acid to decrease plant stress. **Environmental Chemistry Letters**, v. 15, p. 101-123, 2017.

WEI, J.; LI, D. X.; ZHANG, J. R.; SHAN, C.; RENGEL, Z.; SONG, Z. B.; CHEN, Q. Phytomelatonin receptor *PMTR* 1-mediated signaling regulates stomatal closure in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Pineal Research**, v. 65, n. 2, p. e12500, 2018.

WENDEL J. F.; BRUBAKER C. L.; SEELENAN T. The origin and evolution of *Gossypium*. In: STEWART J. M.; OOSTERHUIS D. M.; HEITHOLT J. J.; MAUNEY J. R.; **Physiology of cotton**. Dordrecht: Springer, Netherlands, 2010. p. 1-18.

XU, L.; ZHAO, H.; WANG, J.; WANG, X.; JIA, X.; WANG, L.; YI, K. AIM1-dependent high basal salicylic acid accumulation modulates stomatal aperture in rice. **New Phytologist**, v. 238, n. 4, p. 1420-1430, 2023.

ZHANG, Z.; ZHANG, X.; CHEN, Y.; JIANG, W.; ZHANG, J.; WANG, J.; ZHANG, Y. Understanding the mechanism of red light-induced melatonin biosynthesis facilitates the engineering of melatonin-enriched tomatoes. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 5525, 2023.

ZULFIQAR, F.; ASHRAF, M. Proline alleviates abiotic stress induced oxidative stress in plants. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 8, p. 4629-4651, 2023.

4 CAPÍTULO 2

EFICIÊNCIA DA MAQUINARIA FOTOSSINTÉTICA E STATUS HÍDRICO SÃO DETERMINANTES PARA DESEMPENHO DE CULTIVARES DE ALGODÃO (*Gossypium hirsutum* L.) SOB DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO

A seleção de cultivares resilientes às tensões ambientais é crucial para mitigar os efeitos adversos na produção agrícola global. Nosso estudo teve como objetivo identificar cultivares de algodão adaptadas ao semiárido que apresentassem alto desempenho em condições de restrição hídrica. Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, com delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6×4 , composto por seis cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 912 GLTP RM, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL, FM 978 GLTP RM, FM 985 GLTP) submetido a quatro níveis de irrigação (100, 80, 60 e 40% da capacidade de campo - CC). Aos 20 dias pós diferenciação dos tratamentos hídricos as plantas de algodoeiro apresentaram crescimento e trocas gasosas reduzidos sob 60 e 40% da CC em comparação com plantas dos tratamentos 100 e 80% da CC. Todas as cultivares apresentaram baixo desempenho fisiológico e de crescimento a 40% da CC. Abaixo de 60% da CC, FM 970 e FM 985 apresentaram biomassa seca, área foliar e crescimento superiores, indicando a maior tolerância à seca. Por outro lado, embora FM 911, FM 912 e FM 978 apresentassem taxas mais altas de fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e conteúdo de pigmento fotossintético abaixo de 60 e 40% da CC, eles exibiram aumento da peroxidação lipídica. Além disso, FM 911, FM 970 e FM 974 apresentaram os menores valores de potencial osmótico. Concluindo, os níveis de água de 60 e 40% da CC representam condições de seca moderada e severa para as culturas de algodão, respectivamente. O desempenho superior do FM 970, FM 978 e FM 985 é atribuído ao acúmulo de pigmentos e à eficiência fotossintética, tornando-os cultivares de algodão promissores para cultivo em regiões com escassez de água.

Palavras-chave: Seca, desempenho fotossintético, restrição hídrica, tolerância ao estresse, semiárido.

4.1 Introdução

As plantas estão expostas a diversas condições ambientais adversas que influenciam o seu crescimento e desenvolvimento (MAJEED et al., 2021). A seca destaca-se como um dos estresses abióticos mais severos, caracterizado por uma condição em que a planta perde mais água pela transpiração do que absorve pelas raízes, resultando na redução do potencial hídrico e do turgor celular (LUO et al., 2017).

A exposição a períodos prolongados de déficit hídrico pode interromper os processos de transporte de elétrons nos locais de produção de energia, comomitocondrias e cloroplastos levando ao estresse oxidativo caracterizado pelo aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs). As EROs têm o potencial de oxidar componentes celulares, incluindo proteínas, lipídios e DNA, resultando em última análise na morte celular (KUMAR et al., 2017). Estudos sobre déficit hídrico comumente enfatizam o elevado teor de peroxidação lipídica como um indicador robusto de dano oxidativo induzido pela escassez de água nas plantas. Este fenômeno foi relatado em plantas de algodão (CHEN; ZHANG, 2016), aveia (XIE et al., 2021) e macieira (MIHALJEVIC et al., 2021).

Ao longo da evolução, as plantas desenvolveram respostas bioquímicas e moleculares para restabelecer a homeostase, um aspecto essencial da estratégia de aclimatação. Com efeito, a acumulação de solutos orgânicos e proteínas é crucial para o ajustamento osmótico (ANJUM et al., 2017), contribuindo assim para a regulação da abertura estomática e para o controle da transpiração, essenciais para uma utilização eficiente da água (CARVALHO; AMÂNCIO, 2019). Além disso, as plantas possuem um sofisticado sistema de defesa composto por mecanismos enzimáticos e não enzimáticos, que desempenham um papel crucial na eliminação de EROs, contribuindo assim para a manutenção da integridade das membranas celulares (SHARMA et al., 2019). O acúmulo de prolina, deidrina, pequenas proteínas de choque térmico, ácido abscísico e outros fitohormônios também

desempenha um papel fundamental na defesa das plantas (HE; DING, 2020; MUKARRAM et al., 2021; IQBAL et al., 2022).

O algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) é uma cultura de destaque mundial, que vem contribuindo para o desenvolvimento de muitos países produtores. As projeções sugerem um aumento modesto na produção mundial, atingindo 65 milhões de toneladas até 2040 (JANS et al., 2021). Na safra 2022/2023, o Brasil produziu 3.150 milhões de toneladas de algodão, refletindo um crescimento substancial de 23,3% em relação à safra anterior. A grande produção acompanhou o aumento da área plantada (4%), totalizando 1.663 milhões de hectares e uma produtividade recorde de 1.893 quilos de algodão descaroçado por hectare (CONAB, 2023a). Para a safra 2023/2024, a projeção é que a área plantada aumente 4,2%, atingindo um total de 1.733 milhões de hectares. Porém, há previsão que indica queda de 4,1% na produção esperada, totalizando 3.039,9 milhões de toneladas, atribuída a condições climáticas adversas (CONAB, 2023b).

O cultivo do algodão herbáceo no Brasil concentra-se predominantemente no bioma cerrado (SANTOS et al., 2020), região conhecida por sua alta variabilidade edafoclimática. Nas áreas de cerrado do Nordeste do Brasil, em particular, é comum ocorrerem oscilações nas precipitações e temperaturas elevadas de forma frequente. É importante ressaltar que períodos prolongados de seca, conhecidos como “veranicos”, podem comprometer processos cruciais nas plantas, como a fotossíntese e a expansão celular (KHATTAK et al., 2023). A situação torna-se mais crítica durante a fase reprodutiva, que é altamente sensível à restrição hídrica. Essa sensibilidade resulta em perdas econômicas, afetando diretamente a produção e a qualidade da fibra (BOZOROV et al., 2018). Neste cenário, a identificação e a caracterização de cultivares com alto desempenho sob déficit hídrico tornam-se essenciais para a manutenção e/ou expansão do cultivo do algodão em regiões semiáridas e áreas de transição. A triagem de cultivares pode auxiliar imediatamente os produtores na decisão sobre os materiais genéticos adequados às condições climáticas das regiões semiáridas e contribuir para a prospecção de novos genótipos tolerantes à seca em programas de melhoramento de algodão.

Esta pesquisa teve como objetivo investigar a hipótese de que cultivares de algodão adaptadas à região semiárida apresentam características distintas quando cultivadas em condições de limitação hídrica. Foi realizado utilizando quatro níveis hídricos de capacidade de campo e seis cultivares comerciais. Parâmetros de

crescimento e indicadores fisiológicos foram examinados para elucidar a relação entre tolerância e suscetibilidade das cultivares testadas.

4. 2 Material e métodos

4.2.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e as análises posteriores foram realizadas no Laboratório de Propagação de Plantas, ambos situados na Universidade Federal do Piauí, no Campus Professora Cinobelina Elvas (UFPI/CPCE), localizado em Bom Jesus/PI, sob coordenadas geográficas 9°04'46" S e 44°19'38" W (Figura 1).

4.2.2 Condições de cultivo e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 6×4 , envolvendo seis cultivares de algodão (FM 985 GLTP, FM 978 GLTP RM, FM 974 GL, FM 970 GLTP RM, FM 912 GLTP RM, FM 911 GLTP), e quatro níveis de água (100, 80, 60 e 40% da capacidade de campo - CC), com quatro repetições.

Durante os ensaios, inicialmente, amostras de um latossolo amarelo distrófico foram coletadas da camada de 0-20 cm e submetidas à análise química e físicas. Esse solo foi então utilizado para encher vasos com capacidade de 11 L de solo. O ajuste do pH e a correção dos nutrientes do solo foram realizados conforme necessário com base na saturação por bases descritas na análise do solo, seguindo recomendações para o cultivo do algodão (SOUSA; LOBATO, 2004).

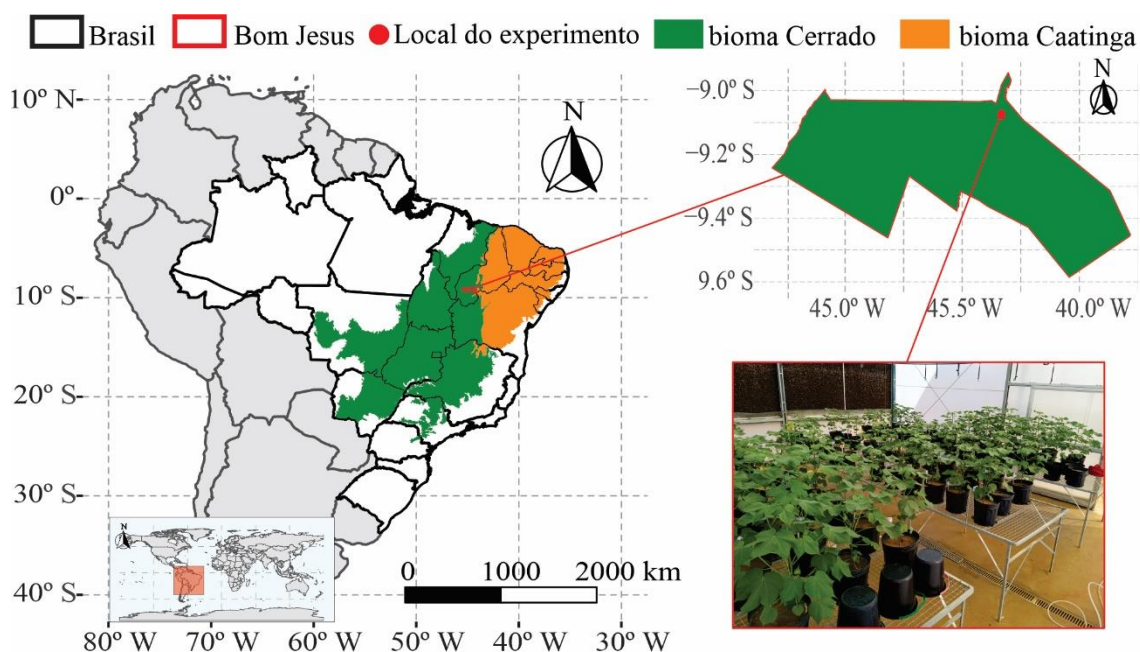


Figura 1 - Mapa do território brasileiro destacando a localização de Bom Jesus, PI (ponto vermelho), em relação à sua posição dentro do bioma de transição entre Cerrado (verde) e Caatinga (laranja).

As cultivares de algodão foram selecionadas com base na sua adaptação ao clima semiárido, selecionou-se cultivares já cultivadas nesse clima. A semeadura foi realizada com cinco sementes por vaso. Após a germinação, aos 7 dias após a semeadura (DAS), foi realizado desbaste para manter apenas as plântulas mais vigorosas por vaso. Posteriormente, foi realizado um segundo desbaste aos 14 DAS para manter apenas uma planta por vaso. As plantas receberam irrigação diária para manter a umidade do solo em níveis correspondentes a 100% da CC, até a conclusão da diferenciação dos tratamentos.

4.2.3 Manejo da irrigação

Os tratamentos foram aplicados nas plantas aos 30 DAS. O manejo da irrigação foi realizado através do método de pesagem dos vasos, seguindo a capacidade de campo determinada após a saturação do solo por 24 horas, conforme descrito por Xu et al. (2009). Os vasos foram pesados diariamente em uma balança eletrônica para monitorar a perda de água por evapotranspiração e repor a

quantidade necessária de água para atingir os regimes de umidade do solo pré-estabelecidos: 100 (controle), 80, 60 e 40% da CC (SILVA et al., 2023). Esses regimes de irrigação foram mantidos por um período de 20 dias, até que as plantas atingissem o estágio de florescimento, momento em que o material vegetal foi coletado.

4.2.4 Massa seca, área foliar e tolerância relativa ao estresse

Durante o processo de coleta, as plantas foram separadas em folhas, caules e raízes. A área foliar foi determinada utilizando um medidor de área foliar (medidor de área modelo LI-3100C, LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EUA). Em seguida, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e mantido em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C. Posteriormente, após atingir peso constante, a massa seca foi determinada utilizando uma balança de precisão. O índice relativo de tolerância ao estresse foi calculado considerando a massa seca total das plantas submetidas ao estresse em comparação com a massa seca das plantas controle, seguindo adaptações da metodologia de Miranda et al. (2021) e Silva et al. (2023).

4.2.5 Suculência foliar e potencial osmótico

A suculência foliar foi determinada utilizando metodologia adaptada de Mantovani (2011) e calculada com a fórmula:

$$SF \text{ (g H}_2\text{O m}^{-2}\text{)} = (MFPA - MSPA) / AF$$

Onde: MFPA = massa fresca da parte aérea; MSPA = massa seca da parte aérea; LA = área foliar.

O potencial osmótico (Ψ_s) foi determinado pela obtenção do suco foliar por meio de prensagem de seringa, seguida de leitura da osmolaridade em micro-osmômetro (Vapor Pressure Osmometer, modelo 5600, Wescor, Utah, EUA). Posteriormente, os valores de Ψ_s foram obtidos através da equação de Van't Hoff: π

$= -R \times T \times C$, onde R é a constante universal dos gases ($0,00831 \text{ kg MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) T é a temperatura em Kelvin, e C é a concentração do soluto (BAO et al., 2014).

4.2.6 Trocas gasosas

Os parâmetros de trocas gasosas foram medidos das 8h00 às 11h00 na primeira folha totalmente expandida utilizando um analisador de gases infravermelho (IRGA, Walz – GFS3000) com fluorômetro acoplado. Os parâmetros analisados incluíram fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e concentração interna de CO_2 (C_i). Usando os dados, foram calculadas a eficiência de carboxilação (A/C_i) da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) e a eficiência instantânea do uso da água (A/E).

4.2.7 Pigmentos fotossintéticos

A extração de pigmentos fotossintéticos, incluindo clorofila a ($Chl a$), b ($Chl b$) e total (Chl total), bem como carotenóides, foi realizada utilizando discos foliares em solução de dimetilsulfóxido (DMSO) saturada com CaCO_3 no escuro. As concentrações dos pigmentos foram determinadas com base nas leituras de absorbância a 665, 649 e 480 nm, aplicando-se as fórmulas propostas por Wellburn (1994).

4.2.8 Peroxidação lipídica de membrana

A avaliação da peroxidação lipídica no tecido foliar foi realizada medindo a produção de malondialdeído (MDA), um subproduto da peroxidação lipídica. Resumidamente, 300 g de material foliar fresco foram macerados em nitrogênio

líquido, após reação com ácido tiobarbitúrico e foram obtidas leituras de absorbância a 532 nm e 600 nm (Heath e Packer, 1968). O conteúdo de MDA foi então calculado utilizando o coeficiente de extinção molar ($\epsilon = 0,155 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

4.2.9 Análise Estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) através do teste F com nível de significância de 5%. As médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($P \leq 0,05$). A Análise de Componentes Principais (PCA) também foi realizada para os conjuntos de dados aqui descritos, utilizando o software R (R Development Core Team, 2016) para análise de dados e geração de gráficos.

4.3 Resultados

4.3.1 Acúmulo de biomassa, área foliar e tolerância relativa ao estresse

Os maiores acúmulos de massa seca e área foliar foram registrados nas cultivares cultivadas com 100% da CC (Figuras 2 e 3). No entanto, em alguns casos, ocorreu um crescimento semelhante ou até maior em plantas sob tratamentos com 80% de CC (Figura 3a, b, c, d, e). Em todos os casos, a restrição hídrica diminuiu significativamente a biomassa seca das plantas de algodão, com efeitos intensificados da redução da disponibilidade de água. O menor acúmulo de biomassa foi observado nas cultivares que cresceram sob a condição de déficit hídrico mais severo (40% da CC) (Figura 2).

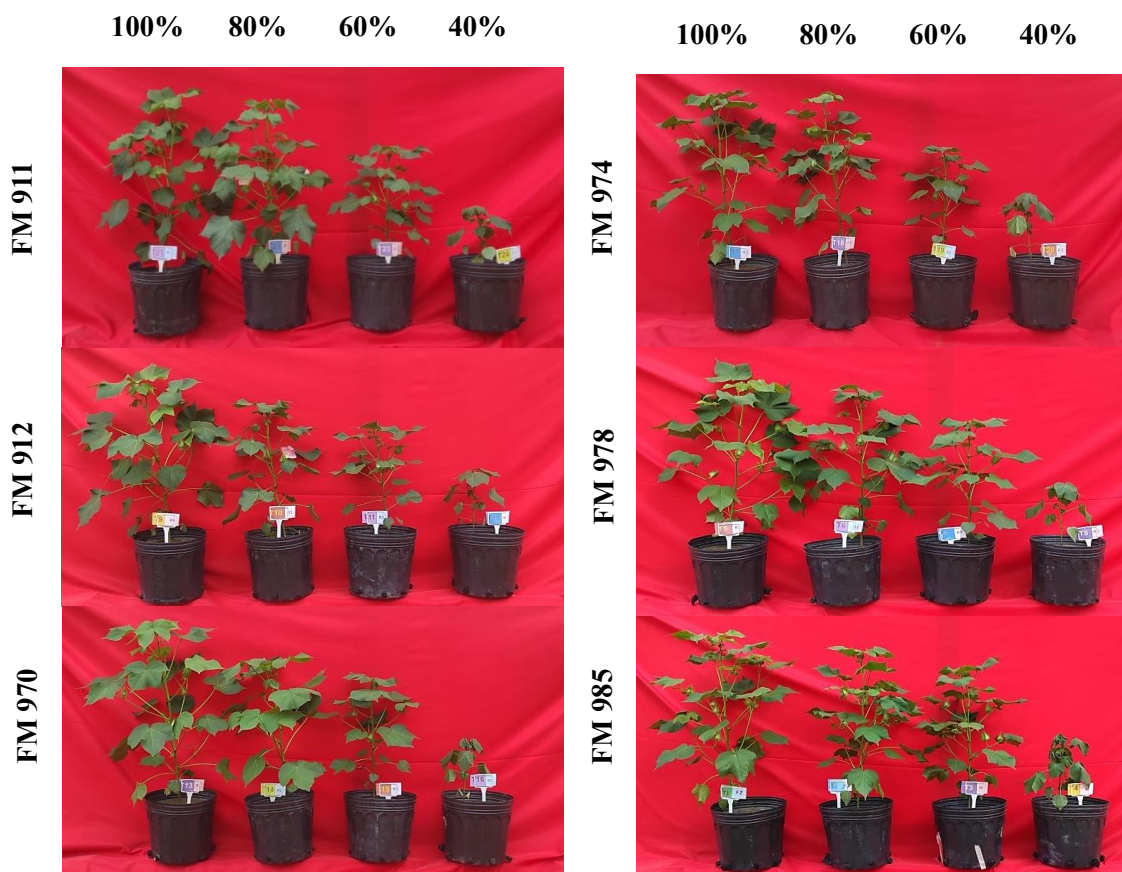


Figura 2 - Desenvolvimento da altura em cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 912 GLTP RM, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL, FM 978 GLTP RM, FM 985 GLTP) sob distintos regimes hídricos (100, 80, 60 e 40% da CC).

A 60% da CC, as cultivares FM 970 e FM 978 destacaram-se ao exibir um acúmulo superior de massa seca de raízes em comparação às demais cultivares estudadas (Figuras 3a). Além disso, as cultivares FM 978 e FM 985 apresentaram valores superiores de caule, folha, massa seca total e área foliar, quando comparadas às outras cultivares de algodão (Figura 3). O menor desempenho de crescimento a 60% da CC foi registrado nas plantas da cultivar FM 974, que apresentaram menor massa seca e área foliar em comparação com outras cultivares. Por outro lado, a 40% da CC, pouca ou nenhuma diferença significativa foi observada entre as cultivares de algodão, com valores semelhantes de massa seca nos tecidos radiculares e aéreos, bem como na área foliar (Figura 3).

O índice de tolerância relativa revelou que o nível de água de 80% da CC teve um efeito restritivo apenas no desempenho das cultivares FM 912 e FM 974. No entanto, pode estimular ou manter inalterado o desempenho da cultivar FM 985, bem como das cultivares FM 911, FM 970 e FM 978.

Os níveis de água de 60 e 40% da CC resultaram em uma diminuição significativa da tolerância do algodoeiro, com efeitos intensificados pela redução na disponibilidade hídrica. A 60% da CC, as cultivares FM 970 e FM 985 exibiram maior tolerância, enquanto os menores índices foram observados nas cultivares FM 974, FM 911 e FM 912. A 40% da CC, todas as cultivares apresentaram índices de tolerância semelhantes, indicando uma condição de grave déficit hídrico para o algodão (Figura 3g).

4.3.2 Potencial osmótico, suculência foliar e peroxidação lipídica

Em condições bem irrigadas (100% da CC), os menores valores de potencial osmótico foram observados em FM 911 e FM 974, em comparação com outras cultivares de algodão (Figura 4a). Reduções no potencial osmótico devido à restrição hídrica foram observadas apenas nas plantas FM 911, FM 970 e FM 974, particularmente em 40% da CC em comparação com 100% da CC. Além disso, essas cultivares exibiram os menores valores de potencial osmótico sob déficit hídrico.

Em geral, todas as cultivares apresentaram maior suculência foliar com 60% da CC em comparação com outros tratamentos de água (Figura 4b). Sob condição hídrica de 60% da CC, as cultivares FM 911, FM 912 e FM 985 exibiram maiores índices de suculência foliar do que outras plantas estudadas. Sob severa restrição hídrica (40% da CC), todas as plantas apresentaram valores reduzidos de suculência foliar, com os efeitos mais proeminentes observados na cultivar FM 974, enquanto a 100 e 80% da CC houve alterações mínimas ou nenhuma alteração.

Os níveis de MDA aumentaram nas plantas cultivadas sob regimes hídricos mais baixos (60 e 40% da CC) em comparação ao controle bem irrigado, exceto para a cultivar FM 974, que apresentou valores semelhantes ao controle (Figura 4c). Nas concentrações de 60 e 40% da CC, os maiores níveis de MDA foram registrados nas cultivares FM 911, FM 912, FM 978 e FM 985 em comparação com outras plantas estudadas.

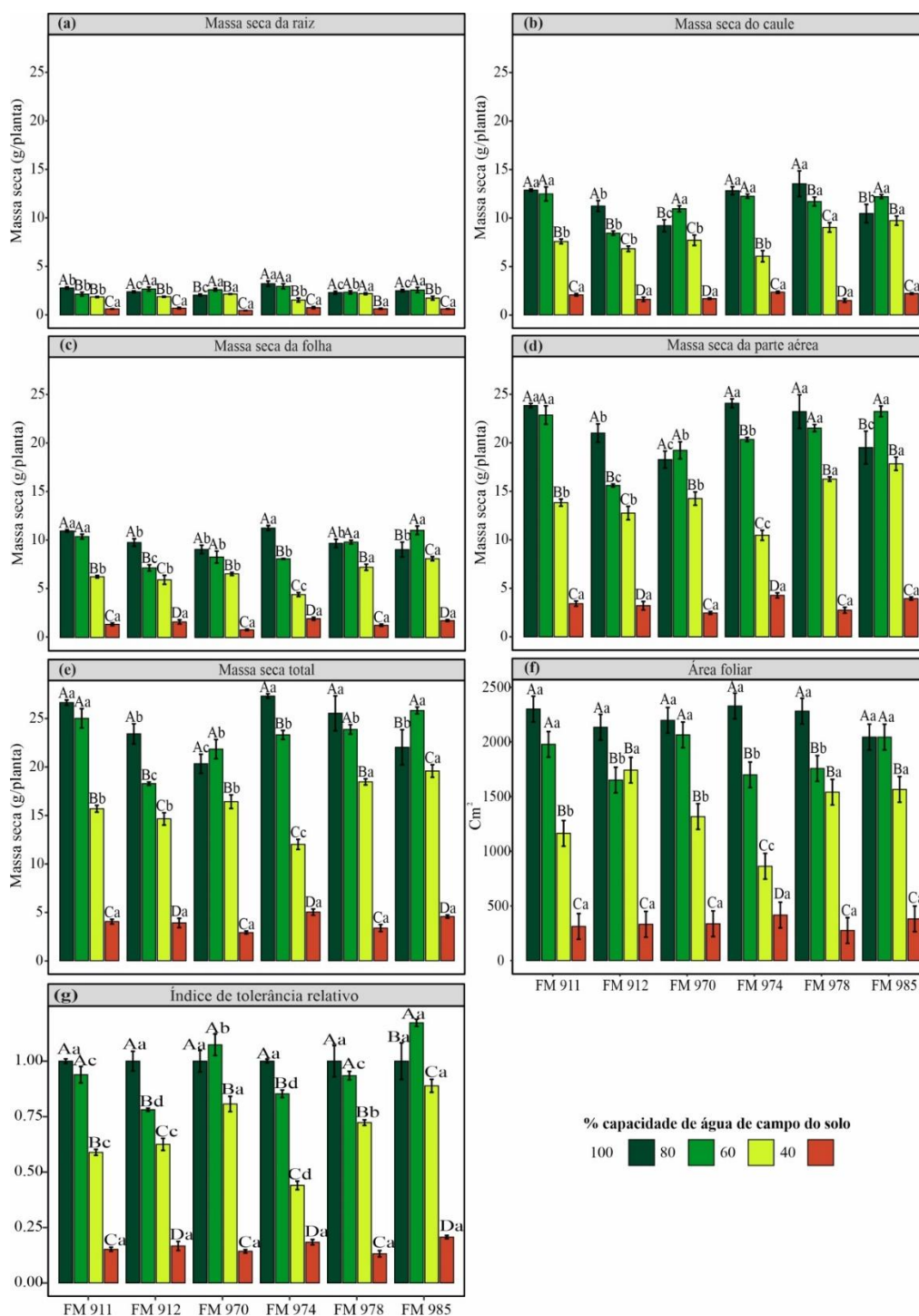


Figura 3 - Massa seca de raízes (a), caule (b), folhas (c), parte aérea (d), massa seca total (e), área foliar (f) e tolerância à seca (g) de cultivares de algodão (FM) 911 GLTP, FM 912 GLTP RM, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL, FM 978 GLTP RM FM 985 GLTP) cultivadas sob diferentes regimes hídricos (100, 80, 60 e 40% da capacidade de campo - CC). Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro do mesmo genótipo de algodão. Letras minúsculas comparam genótipos de algodão dentro do mesmo regime hídrico. Letras maiúsculas e minúsculas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Scott-Knot ($p \leq 0,05$).

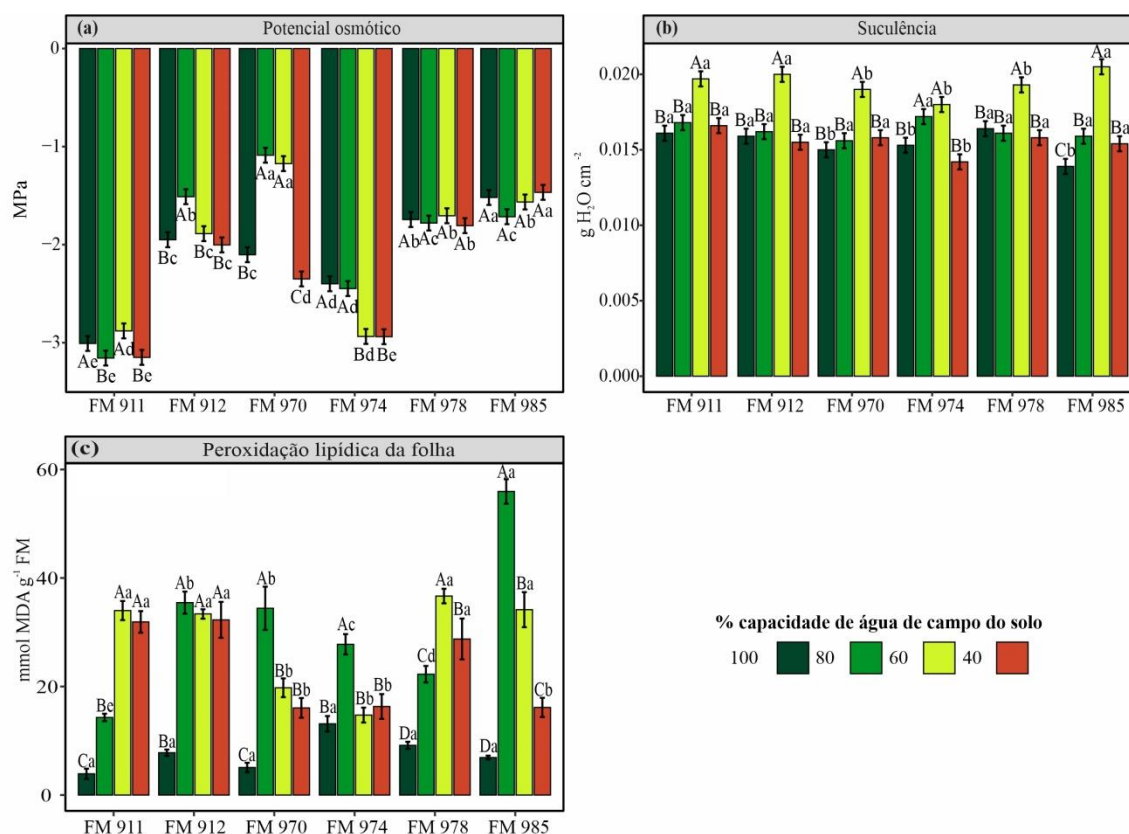


Figura 4 - Potencial Osmótico (a), Suculência Folha (b) e Peroxidação Lipídica (c) de Cultivares de Algodão (FM 911 GLTP, FM 912 GLTP RM, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL, FM 978 GLTP RM FM 985 GLTP) sob diferentes regimes hídricos (100, 80, 60 e 40% da CC). Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro do mesmo genótipo de algodão. Letras minúsculas comparam genótipos de algodão dentro do mesmo regime hídrico. Letras maiúsculas e minúsculas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Scott-Knot ($p \leq 0,05$).

4.3.3 Eficiência da maquinaria fotossintética

As cultivares exibiram regulação distinta nas trocas gasosas e nos índices de eficiência, cuja resposta foi dependente do nível de água do solo (Figura 5). Surpreendentemente, as plantas FM 911, FM 912 e FM 978 apresentaram aumentos nas taxas de assimilação de CO₂ quando o nível de água do solo foi reduzido para 60% da CC, em comparação com seus controles bem irrigados a 100% da CC (Figura 5a). No entanto, a redução da água para 40% da CC levou a reduções severas nas taxas de assimilação de CO₂ para todas as cultivares em comparação com o controle, exceto para a cultivar FM 985, que manteve taxas semelhantes em

todos os regimes hídricos. A 60% da CC, as maiores taxas de assimilação foram observadas nas cultivares FM 911, FM 912 e FM 978, enquanto que a 40% da CC, as maiores taxas foram registradas nas plantas FM 985, seguida pela FM 970.

A regulação das taxas de transpiração e da condutância estomática pelos tratamentos hídricos ocorreu de maneira praticamente idêntica ao observado para a assimilação de CO_2 entre as cultivares de algodão (Figura 5b, c). Em todos os casos, as reduções foram mais evidentes nas plantas irrigadas com 40% da CC, e as plantas FM 912 e FM 978 com 60% da CC exibiram condutância estomática e taxas de transpiração superiores às de plantas bem irrigadas.

Neste trabalho, foi observada diminuição na concentração interna de CO_2 (C_i) apenas na cultivar FM 912 submetida a condições estressantes (60 e 40% da CC), em comparação às plantas controle. Para FM 912, FM 974 e FM 985, foram observadas reduções de C_i quando cultivadas a 40% da CC, diferenciando-as das demais cultivares (Figura 4d). Pelo contrário, a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) foi regulada diferencialmente dependendo da cultivar de algodão. Notadamente, a cultivar FM 985 manteve inalterada a A/C_i independente das condições de estresse hídrico; enquanto todas as outras cultivares apresentaram redução de A/C_i a 40% da CC (Figura 5e).

Os regimes hídricos não impactaram a eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s), exceto para a cultivar FM 912, que apresentou menor A/g_s quando submetida a 80% de CC (Figura 5f). Em relação à eficiência instantânea do uso da água (A/E), apenas as cultivares FM 970, FM 974 e FM 985 não apresentaram diferenças, independente da lâmina de irrigação utilizada. A cultivar FM 978 foi a única que apresentou menor A/E em condições estressantes (60 e 40% da CC) (Figura 5g).

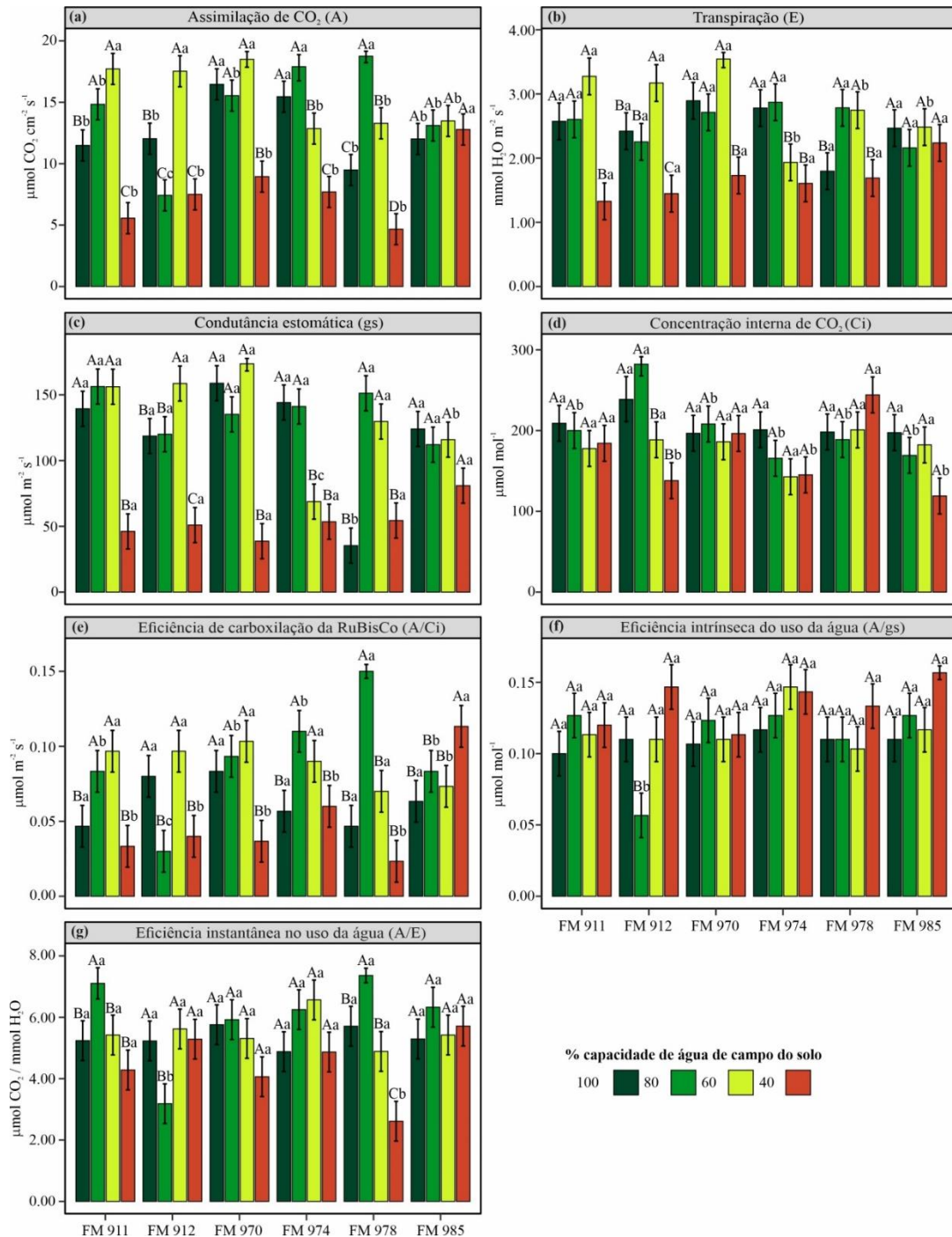


Figura 5 - Fotossíntese líquida (A, a), transpiração (E, b), condutância estomática (gs, c), concentração interna de CO_2 (Ci , d), Carboxilação instantânea (A/Ci , e), eficiência intrínseca do uso da água (A/g , f) e eficiência instantânea do uso da água (A/E , g) das cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 912 GLTP RM, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL, FM 978 GLTP RM FM 985 GLTP) sob diferentes regimes hídricos (100, 80, 60 e 40% da CC). Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro do mesmo genótipo de algodão. Letras minúsculas comparam genótipos de algodão dentro do mesmo regime hídrico. Letras maiúsculas e minúsculas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Scott-Knot ($p \leq 0,05$).

4.3.4 Pigmentos fotossintéticos

Os pigmentos fotossintéticos são apresentados na Figura 6, revelando que as plantas apresentaram comportamento diferenciado dependendo do regime hídrico. Em todos os casos, as plantas FM 974 apresentaram níveis de *Chl a*, *Chl* total e carotenoides inalterados pelos regimes hídricos, mas exibiram reduções no *Chl b* quando a disponibilidade de água foi reduzida, em comparação com o tratamento bem irrigado a 100% da CC. Por outro lado, a cultivar FM 985 apresentou forte diminuição nos pigmentos fotossintéticos devido à diminuição da disponibilidade de água, exceto carotenoides; enquanto a cultivar FM 911 apresentou níveis de pigmentos semelhantes quando irrigada com 100, 60 e 40% da CC, com aumentos em todos os pigmentos quando cultivada com 80% da CC em relação ao controle. Para a cultivar FM 970, foram observadas reduções significativas na *Chl a* e na *Chl* total a 60% da CC (Figura 6a, c), e nos níveis de carotenoides a 60 e 40% da CC (Figura 6d), em comparação com o controle bem irrigado (100% da CC).

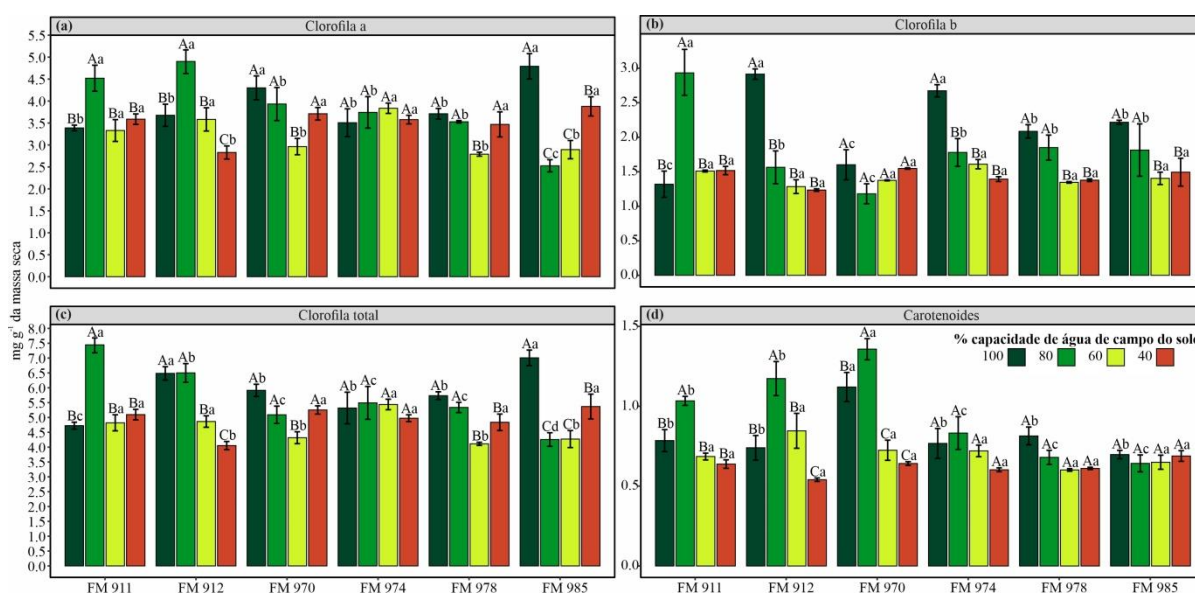


Figura 6 - Teores de clorofila a (*Chl a*, a), clorofila b (*Chl b*, b), clorofila total (*Chl* total, c) e carotenóides (d) em cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 912 GLTP RM, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL, FM 978 GLTP RM, FM 985 GLTP) sob diferentes regimes hídricos (100, 80, 60 e 40% da CC). Letras maiúsculas comparam os regimes hídricos dentro do mesmo genótipo de algodão. Letras minúsculas comparam genótipos de algodão dentro do mesmo regime hídrico. Letras maiúsculas e minúsculas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Scott-Knot ($p \leq 0,05$)

4.3.5 Análise do componente principal

Para investigar a influência do déficit hídrico nos parâmetros avaliados e a inter-relação entre todos os componentes, foi realizada uma análise multivariada por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) (Figura 7). Os dados indicaram que os parâmetros avaliados foram suficientes para identificar as correlações e os múltiplos efeitos dos tratamentos com diferentes níveis de água nas cultivares de algodão. Os dados explicam 72,5% da distribuição total, sendo 57,6% dos dados no PC1 e 14,9% no PC2. São observados três grupos, organizados aleatoriamente com base na interação cultivar $\times$ lâmina de irrigação.

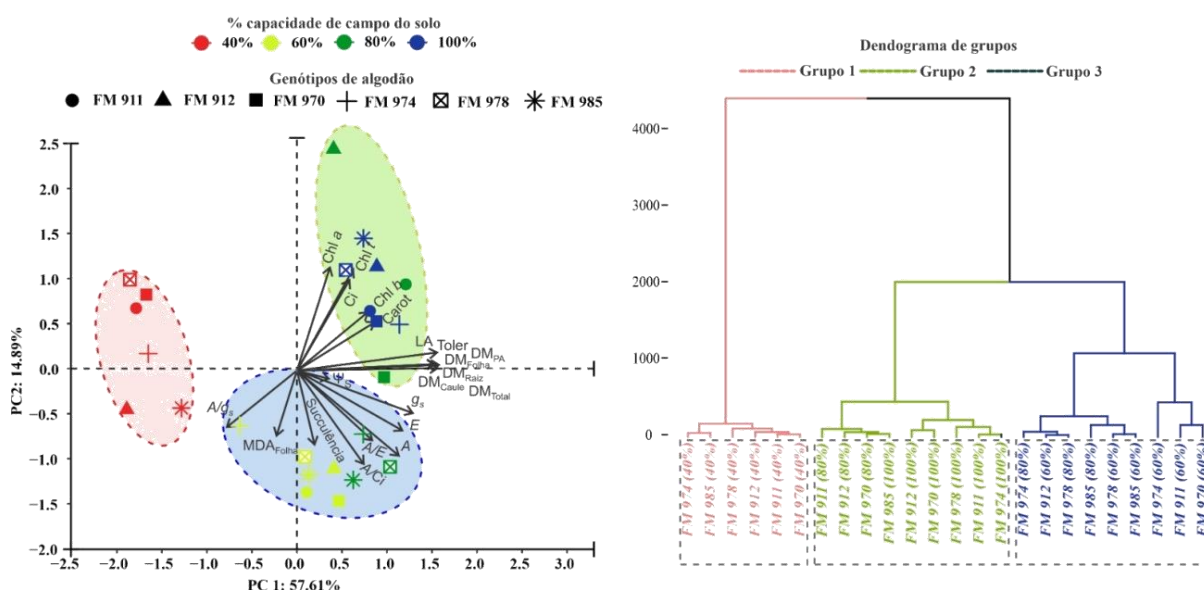


Figura 7 - Gráfico biplot para biomassa e atributos fisiológicos: massa seca total, massa seca do caule, massa seca das folhas, massa seca das raízes, massa seca da parte aérea, área foliar, tolerância relativa ao estresse, peroxidação lipídica, suculência foliar, potencial osmótico, clorofila a, clorofila b, clorofila total, carotenóides, concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência intrínseca no uso da água (A/g_s), eficiência de carboxilação Rubisco (A/C_i), eficiência instantânea no uso da água (A/E), fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s).

O desempenho inadequado das cultivares submetidas a 40% da CC ficou evidente, conforme indicado pela separação distinta de um grupo que apresentou pouca correlação com parâmetros biométricos como área foliar, massa seca do caule, massa radicular e massa seca total da parte aérea e do solo. Este grupo específico de plantas apresentou maior sensibilidade ao déficit hídrico, apresentando uma correlação negativa com a tolerância relativa ao estresse. Um segundo grupo

compreendeu todas as cultivares irrigadas com 100% da CC, juntamente com as cultivares FM 970, FM 912, FM 911 com 80% da CC. Este grupo demonstrou forte correlação com pigmentos fotossintéticos (*Chl a*, *Chl b*, *Chl* total, carotenóides), acúmulo de biomassa (massa seca acima do solo, massa seca de raiz, massa seca de folha, massa seca de caule e massa seca total), área foliar, concentração interna de CO₂ e tolerância relativa ao estresse. O terceiro grupo, abrangendo todas as cultivares crescendo em 60% da CC e as cultivares FM 985, FM 978, FM 974 a 80% da CC, apresentou correlações com parâmetros de trocas gasosas (*A*, *E* e *gs*), eficiências de carboxilação (*A/Ci*), eficiências de uso de água (*A/gs* e *A/E*), peroxidação lipídica, suculência foliar e potencial osmótico.

4.4 Discussão

4.4.1 O algodoeiro apresenta limite de tolerância ao déficit hídrico dependendo do regime hídrico

Com base no contexto deste estudo, diversas cultivares de algodão expostas a regimes hídricos distintos exibiram notável desempenho fisiológico quando cultivadas em condições de disponibilidade hídrica abundante. Isto foi evidenciado pelo crescimento vigoroso observado nos grupos controle com 100 e 80% da CC. Algumas cultivares apresentaram desempenho semelhante ou até superior quando cultivadas em 80% da CC, como as cultivares FM 970, FM 974 e FM 985, refletindo em melhor uso da água, manejo e economia (BEGNA, 2023). Por outro lado, as cultivares FM 970, FM 974 e FM 985 apresentaram crescimento e área foliar reduzidos em condições de déficit hídrico (60% da CC) em comparação com plantas bem irrigadas. Surpreendentemente, essas cultivares demonstraram maior acúmulo de biomassa do que as plantas submetidas à seca severa (40% da CC). Esses achados sugerem que, mesmo sob condições estressantes, plantas crescidas em 60% da CC foram capazes de restaurar parcialmente o desempenho de crescimento (Figura 3), corroborando com os resultados de Barros Junior et al. (2021). De fato, as plantas submetidas a seca moderada (60% da CC) apresentaram maior

suculência foliar, indicando uma resposta adaptativa nos tecidos foliares à desidratação. Este fenômeno digno de nota, particularmente observado nas cultivares FM 911, FM 912 e FM 985 (Figura 4b), sugere uma possível resposta isoídrica, que pode contribuir para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico (JOHN, HENRY; SACK 2018; GUO et al., 2023). Por outro lado, as nossas conclusões também enfatizam que uma condição de capacidade de campo de 40% deve ser reconhecida como estresse hídrico severo para o algodão. Corroborando com nossos resultados, todas as seis cultivares testadas apresentaram menor desempenho de crescimento, conforme evidenciado pela redução da biomassa seca, área foliar e diminuição dos níveis de tolerância relativa ao estresse (Figuras 2, 3). Assim é possível categorizar as capacidades de campo de 100 e 80% como condições de controle, e 60 e 40% da CC como seca moderada e severa, respectivamente, para o cultivo do algodão.

4.4.2 A eficiência da maquinaria fotossintética parece ser determinante para melhor desempenho do algodão sob déficit hídrico

O aumento observado na fotossíntese líquida em todas as cultivares abaixo de 60% da CC pode ser atribuído à interceptação da otimização da radiação solar e à distribuição eficiente dentro da copa da planta (Figuras 3, 5a). Esta melhoria é digna de nota, especialmente considerando a redução do crescimento e consequente diminuição do sombreamento nestas condições. É relevante destacar a estreita relação entre A (taxa de fotossíntese) e g_s (condutância estomática). A condutância estomática serve como um indicador da disponibilidade de CO_2 nas células do mesófilo, influenciando diretamente A . Em determinadas cultivares, observa-se fechamento estomático, resultando em redução da fotossíntese, como observado em todas as cultivares estudadas quando cultivadas a 40% da CC, (Figura 5), corroborando com resultados demonstrado por Ahmad et al. (2020) durante a triagem de genótipos de algodão submetidos à seca. Excepcionalmente, a cultivar FM 985 apresentou tolerância ao déficit hídrico, não apresentando variação em A sob quatro diferentes condições hídricas. Por outro lado, a cultivar FM 911 demonstrou redução na eficiência fotossintética mesmo sob 100% da CC em

comparação com 80% da CC, sugerindo estresse causado pelo excesso de água para essas plantas.

A correlação observada entre o declínio nas taxas A , g_s e E (Figura 5a, b, c) e a diminuição na eficiência do uso da água (A/C_i) (Figura 5e) sugere o envolvimento de fatores estomáticos em vez de características não estomáticas (ZHAO et al., 2020). Relacionado à ação do ácido abscísico (ABA) responsável por reduzir a concentração de íons nas células guarda, com consequente fechamento estomático (LIU et al., 2022). Esses fatores, combinados com mudanças no estado hídrico das células, baixa concentração de CO_2 , altas temperaturas e fixação de CO_2 , levam as plantas a fecharem rapidamente os estômatos (ABDULBAK et al., 2022). Consequentemente, a diminuição do C_i indica a disponibilidade limitada de substrato para ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) (BANSAL et al., 2019) explicando a diminuição do desempenho fotossintético das cultivares FM 912, FM 974 e FM 985 sob condições de seca (40 e 60% da CC) em comparação com outras cultivares estudadas (Figura 5d).

Os pigmentos fotossintéticos desempenham um papel crucial na maquinaria fotossintética, pois a *Chl a* presente nos complexos de antenas maximiza a captação da luz disponível e está diretamente ligada à fotossíntese (SOLOVCHENKO; YAHIA; CHEN, 2019). No entanto, apesar de manterem um elevado teor de pigmentos fotossintéticos, as cultivares FM 970, FM 974 e FM 978 apresentaram reduções em A . Essa resposta foi associada à diminuição da g_s , demonstrando que o comprometimento da fotossíntese foi provavelmente devido a limitações estomáticas (SHEKOOFA et al., 2021).

Na maioria das espécies de plantas, *Chl a* e carotenóides desempenham papéis adaptativos cruciais em plantas submetidas a condições secas, estimulando a atividade PS I, a fotofosforilação cíclica e preservando a integridade da membrana do tilacóide (TUBA, 1984; LICHTENTHALER; BABANI, 2022). Esses compostos desempenham papéis versáteis na eficiência fotossintética, abrangendo fotoproteção, transferência de energia e regulação do equilíbrio entre absorção de luz e fotossíntese, atuando também na eliminação de EROs (MOHARRAMNEJAD et al., 2019; SHAREEF; ABD; FAHAD, 2020; REHMAN; AZHAR, 2021). No presente estudo, o acúmulo de *Chl a* e carotenóides reforça a ideia de composto importante para maior tolerância, como exemplificado pelas cultivares FM 970, FM 974 e FM 978. apresentaram bom equilíbrio entre A , E e C_i . Assim, nossos achados

evidenciam que o desempenho destacado da cultivar FM 970 sob condições estressantes (60% da CC) esteve intimamente relacionado ao acúmulo de carotenoides, que atuam como antioxidantes e protetores dos fotossistemas.

4.4.3 A redução do dano oxidativo no algodão parece ser mais relevante para a tolerância ao estresse do que o ajuste osmótico

O conteúdo de malondialdeído (MDA) serve como um marcador crucial para a peroxidação lipídica causada principalmente pelo acúmulo de EROs e subsequente estresse oxidativo (MORALES; MUNNÉ-BOSCH, 2019). Em nosso estudo, o teor de MDA aumentou nas cultivares sensíveis à medida que a disponibilidade de água diminuiu (60 e 40% da CC), conforme observado nas plantas FM 911 e FM 912 (Figura 4c). Em contraste, as cultivares tolerantes (FM 970, FM 974 e FM 985) apresentaram menor teor de MDA nas mesmas condições de água. Esta variação na peroxidação lipídica pode ser atribuída a mecanismos de defesa enzimáticos e não enzimáticos, que atuam na eliminação dos radicais livres (KHALEGHI et al., 2019; KHODABIN et al., 2020). A menor peroxidação lipídica reforça o elevado desempenho e a alta tolerância à seca das cultivares FM 970 e FM 985. Em contrapartida, as cultivares FM 911 e FM 912 apresentaram maior sensibilidade quando a umidade do solo diminuiu (FISCHER; MAURER 1978; GRZESIAK et al., 2019).

Nossos dados evidenciam que a peroxidação lipídica está pouco correlacionada com o ajuste osmótico, pois houve alteração mínima no potencial osmótico e na suculência foliar nas cultivares estudadas (Figuras 4a, b). Nossos dados revelam que as cultivares FM 978 e FM 985 apresentam outros mecanismos de aclimação à seca a 60% da CC (Figura 3), uma vez que não foi registrada diminuição significativa no potencial osmótico (Figura 4a). Por outro lado, o ajuste osmótico nas plantas FM 912 cultivadas sob 60% da CC pode ter contribuído para uma melhor área foliar e redução das perdas de biomassa se comparadas àquelas cultivadas sob 80% da CC (Figura 3f). Portanto, a ativação dos mecanismos de resposta pode ser um fator intrínseco de cada cultivar para desencadear as vias de defesa (IQBAL et al., 2020). Além disso, por meio da regulação do ajuste osmótico,

as plantas podem se adaptar ao ambiente, aproveitando melhor a água e ajustando a fotossíntese (HURA, HURA; OSTROWSK, 2022).

4.5 Conclusão

Os dados revelam que as cultivares de algodão apresentam respostas distintas sob restrição hídrica e apresentam alta sensibilidade a um déficit hídrico de 40% da CC, representando uma condição de estresse severo. A lâmina de água com 60% da CC representa um estresse hídrico moderado. A irrigação com umidade equivalente a 80% da CC mostra-se uma estratégia viável para produção das cultivares de algodão FM 970, FM 974 e FM 985, oferecendo sugestões para uma gestão mais eficiente da água.

Os dados obtidos permitem classificar cultivares de algodão adaptadas ao clima semiárido quanto a tolerância ou sensibilidade ao déficit hídrico. As plantas FM 970, FM 978 e FM 985 apresentam maior tolerância ao estresse. O desempenho superior das cultivares de algodão sob seca está associado ao acúmulo de pigmentos e à eficiência fotossintética, resultante do menor dano oxidativo aos tecidos aéreos. A sensibilidade das cultivares FM 911 e FM 912 ficou evidente com redução drástica de biomassa, maior peroxidação lipídica e menor desempenho fotossintético.

Este estudo pode ter um impacto significativo na cotonicultura de regiões com pouca disponibilidade de água, como o cerrado piauiense e a região do MATOPIBA, ao auxiliar na seleção direta de variedades mais tolerantes. Os dados podem ainda contribuir para a identificação de genitores com tolerância ao déficit hídrico em programas de melhoramento genético.

4.6 Referências

ABDULBAKI, A. S.; ALSAMADANY, H.; ALZHRANI, Y.; OLAYINKA, B. U. Rubisco and abiotic stresses in plants: Current assessment. **Turkish Journal of Botany**, v. 46, n. 6, p. 541-552, 2022.

AHMAD, A.; ILYAS, M. Z.; ASLAM, Z.; ROMAN, M.; ALI, A.; NAEEM, S.; REHMAN, S. Physiological screening of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) genotypes against drought tolerance. **Pure and Applied Biology**, v. 9, n. 1, p. 140-147, 2020.

ANJUM, S. A.; ASHRAF, U.; TANVEER, M.; KHAN, I.; HUSSAIN, S.; SHAHZAD, B.; WANG, L. C. Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 69, 2017.

BANSAL, S.; THAKUR, A.; SINGH, S.; BAKSHI, M.; BANSAL, S. Changes in crop physiology under drought stress: A review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 4, p. 1251-1253, 2019.

BAO, A. K.; WANG, Y. W.; XI, J. J.; LIU, C.; ZHANG, J. L.; WANG, S. M. Co-expression of xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* ZxNHX and ZxVP1-1 enhances salt and drought tolerance in transgenic *Lotus corniculatus* by increasing cations accumulation. **Functional Plant Biology**, v. 41, n. 2, p. 203-214, 2013.

BARROS JUNIOR, U. O.; LIMA, M. D.; ALSAHLI, A. A.; LOBATO, A. K. Unraveling the roles of brassinosteroids in alleviating drought stress in young *Eucalyptus urophylla* plants: Implications on redox homeostasis and photosynthetic apparatus. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 748-761, 2021.

BEGNA, T. Impact of drought stress on crop production and its management options. **International Journal of Research in Agronomy**, v. 4, n. 2, p. 66-74, 2021.

BOZOROV, T. A.; USMANOV, R. M.; YANG, H.; HAMDULLAEV, S. A.; MUSAYEV, S.; SHAVKIEV, J.; ABDULLAEV, A. A. Effect of water deficiency on relationships between metabolism, physiology, biomass, and yield of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Journal of Arid Land**, v. 10, p. 441-456, 2018.

CARVALHO, L. C.; AMÂNCIO, S. Cutting the Gordian Knot of abiotic stress in grapevine: from the test tube to climate change adaptation. **Physiologia Plantarum**, v. 165, n. 2, p. 330-342, 2019.

CHEN, T.; ZHANG, B. Measurements of proline and malondialdehyde content and antioxidant enzyme activities in leaves of drought stressed cotton. **Bio-Protocol**, v. 6, n. 17, p. e1913-e1913, 2016.

CONAB a. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: décimo segundo levantamento, setembro 2023, v. 10, safra 2022/2023. Brasília. 2023.

CONAB b. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: segundo levantamento, novembro 2023, v. 11, safra 2023/2024. Brasília. 2023.

SANTOS, A.; SILVA M. E.; SILVA F.O.; GALBIERI, R.; LAL, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: The impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 126090, 2020.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004.

SOLOVCHENKO, A.; Y.; ELHADI M.; CHEN, C. Pigments. In: YAHIA, E. I.; CARRILLO-LOPEZ, A. **Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables**: Woodhead publishing, 2019, p. 225-252.

SHARMA, P.; SHARMA, P.; ARORA, P.; VERMA, V.; KHANNA, K.; SAINI, P.; BHARDWAJ, R. Role and regulation of ROS and antioxidants as signaling molecules in response to abiotic stresses. In: IQBAL, M.; KHAN, R.; REDDY, P. S.; FERRANTE, A.; KHAN, N. A. **Plant Signaling Molecules**: Woodhead Publishing, 2019, p. 141-156.

FISCHER, R. A.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 29, n. 5, p. 897-912, 1978.

GRZESIAK, S.; HORDYŃSKA, N.; SZCZYREK, P.; GRZESIAK, M. T.; NOGA, A.; SZECHYŃSKA-HEBDA, M. Variation among wheat (*Triticum easativum* L.) genotypes in response to the drought stress: I–selection approaches. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, p. 30-44, 2019.

GUO, B.; ARNDT, S. K.; MILLER, R. E.; SZOTA, C.; FARRELL, C. How does leaf succulence relate with plant drought resistance in woody shrubs?. **Tree Physiology**, p.66, 2023.

HE, M.; DING, N.Z. Plant unsaturated fatty acids: multiple roles in stress response. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 562785, 2020.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189-198, 1968.

HURA, T.; HURA, K.; OSTROWSKA, A. Drought-stress induced physiological and molecular changes in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 9, p. 4698, 2022.

IQBAL, A.; DONG, Q.; WANG, X.; GUI, H.; ZHANG, H.; ZHANG, X.; SONG, M. High nitrogen enhance drought tolerance in cotton through antioxidant enzymatic activities, nitrogen metabolism and osmotic adjustment. **Plants**, v. 9, n. 2, p. 178, 2020.

IQBAL, S.; WANG, X.; MUBEEN, I.; KAMRAN, M.; KANWAL, I.; DÍAZ, G. A.; FAHAD, S. Phytohormones trigger drought tolerance in crop plants: outlook and future perspectives. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 3378, 2022.

JANS, Y.; VON BLOH, W.; SCHAPHOFF, S.; MÜLLER, C. Global cotton production under climate change–Implications for yield and water consumption. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 4, p. 2027-2044, 2021.

JOHN, G. P.; HENRY, C.; SACK, L. Leaf rehydration capacity: associations with other indices of drought tolerance and environment. **Plant, Cell and Environment**, v. 41, n. 11, p. 2638-2653, 2018.

KHALEGHI, A.; NADERI, R.; BRUNETTI, C.; MASERTI, B.E.; SALAMI, S. A.; BABALAR, M. Morphological, physiochemical and antioxidant responses of *Maclura pomifera* to drought stress. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 19250, 2019.

KHATTAK, W. A.; HE, J.; SUN, J.; ALI, I.; BILAL, W.; ZAHOOR, Z. Z. Foliar melatonin ameliorates drought-induced alterations in enzyme activities of sugar and nitrogen metabolisms in cotton leaves. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 5, p. 14011, 2023.

KHODABIN, G.; TAHMASEBI-SARVESTANI, Z.; RAD, A. H. S.; MODARRES-SANAVY, S. A. M. Effect of drought stress on certain morphological and physiological characteristics of a resistant and a sensitive canola cultivar. **Chemistry & Biodiversity**, v. 17, n. 2, p. e1900399, 2020.

KUMAR, S.; BEENA, A. S.; AWANA, M.; SINGH, A. Physiological, biochemical, epigenetic and molecular analyses of wheat (*Triticum aestivum*) genotypes with contrasting salt tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1151, 2017.

LICHTENTHALER, H. K.; BABANI, F. Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll a/b and chlorophylls to carotenoids (a+b)/(x+c) in C4 plants as compared to C3 plants. **Photosynthetica**, v. 60, n. 1, p. 3-9, 2022.

LIU, H.; SONG, S.; ZHANG, H.; LI, Y.; NIU, L.; ZHANG, J.; WANG, W. Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca^{2+} in plant stomatal closure in response to drought. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 23, p. 14824, 2022.

Luo, X.; Were, P.; Hou, Z.; Gou, Y. Determination of shale osmotic pressure using spontaneous potential log. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 1, p. 19, 2017.

MAJEED, S.; RANA, I. A.; MUBARIK, M. S.; ATIF, R. M.; YANG, S. H.; CHUNG, G.; AZHAR, M.T. Heat stress in cotton: a review on predicted and unpredicted growth-yield anomalies and mitigating breeding strategies. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1825, 2021.

MANTOVANI, A. A method to improve leaf succulence quantification. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, 2011.

MIRANDA, R. S.; SOUZA, F. I. L.; ALVES, A. F.; SOUZA, R. R.; MESQUITA, R. O.; RIBEIRO, M. I. D.; GOMES-FILHO, E. Salt-acclimation physiological mechanisms at the vegetative stage of cowpea genotypes in soils from a semiarid region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 4, p. 3530-3543, 2021.

MIHALJEVIĆ, I.; VILJEVAC VULETIĆ, M.; ŠIMIĆ, D.; TOMAŠ, V.; HORVAT, D.; JOSIPOVIĆ, M.; VUKOVIĆ, D. Comparative study of drought stress effects on traditional and modern apple cultivars. **Plants**, v. 10, n. 3, p. 561, 2021.

MOHARRAMNEJAD, S. A. J. J. A. D.; SOFALIAN, O.; VALIZADEH, M.; ASGHARI, A.; SHIRI, M.; ASHRAF, M. U. H. A. M. M. A. D. Response of maize to field drought stress: oxidative defense system, osmolytes' accumulation and photosynthetic pigments. **Pakistan Journal of Botany**, v. 51, n. 3, p. 799-807, 2019.

MORALES, M.; MUNNÉ-BOSCH, S. Malondialdehyde: Facts and artifacts. **Plant Physiology**, v. 180, n. 3, p. 1246-1250, 2019.

MUKARRAM, M.; CHOUDHARY, S.; KURJAK, D.; PETEK, A.; KHAN, M. M. A. Drought: Sensing, signalling, effects and tolerance in higher plants. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1291-1300, 2021.

REHMAN, A.; AZHAR, M. T. Genetic assessment of chlorophyll A and B, carotenoids and stomatal conductance in leaf tissue of upland cotton in water stress conditions. **Journal of Animal & Plant Sciences**, v. 31, n. 1, 2021.

SANTOS, D. P.; SCHOSSLER, T. R.; SANTOS, I. L. D.; MELO, N. B.; SANTOS, G. G. Soil macrofauna in a Cerrado/Caatinga ecotone under different crops in Southwestern Piauí State, Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, 2017.

SHAREEF, H. J.; ABDI, G.; FAHAD, S. Change in photosynthetic pigments of Date palm offshoots under abiotic stress factors. **Folia Oecologica**, v. 47, n. 1, p. 45-51, 2020.

SHEKOOFA, A.; SAFIKHAN, S.; SNIDER, J. L.; RAPER, T. B.; BOURLAND, F. M. Variation in stomatal conductance responses of cotton cultivars to high vapour pressure deficit under controlled and rainfed environments. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 2, p. 332-343, 2021.

SILVA, A. C.; DE BRITO, F. M.; SANTOS, A. S.; DE BRITO, R. R.; JUNIO DE JESUS, J. L.; ALCANTARA NETO, F.; MIRANDA, R.S. Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) plants display contrasting sulfur-mediated drought acclimation in greenhouse and field. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 15, p. 3550-3569, 2023.

TUBA, Z. Rearrangement of photosynthetic pigment composition in C₄, C₃ and CAM species during drought and recovery. **Journal of Plant Physiology**, v. 115, n. 4, p. 331-338, 1984.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

XIE, H.; LI, M.; CHEN, Y.; ZHOU, Q.; LIU, W.; LIANG, G.; JIA, Z. Important physiological changes due to drought stress on oat. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 9, p. 644726, 2021.

XU, L.; ZHAO, H.; WANG, J.; WANG, X.; JIA, X.; WANG, L.; YI, K. AIM1-dependent high basal salicylic acid accumulation modulates stomatal aperture in rice. **New Phytologist**, v. 238, n. 4, p. 1420-1430, 2023.

ZHAO, W.; LIU, L.; SHEN, Q.; YANG, J.; HAN, X.; TIAN, F.; WU, J. Effects of water stress on photosynthesis, yield, and water use efficiency in winter wheat. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2127, 2020.

5 CAPÍTULO 3

ÁCIDO SALICÍLICO EXÓGENO ALIVIA OS DANOS DO DÉFICIT HÍDRICO SOBRE A MAQUINÁRIA FOTOSSINTÉTICA E CRESCIMENTO PELO ACIONAMENTO DO SISTEMA DE DEFESA ANTIOXIDANTE EM PLANTAS DE ALGODÃO

RESUMO

Diante das adversidades climáticas e de maiores períodos de escassez hídrica e chuvas irregulares, principalmente nas regiões produtoras, estratégias estão sendo investigadas para tornar as plantas mais tolerantes aos estresses ambientais. O presente estudo teve como objetivo identificar o papel de moléculas sinalizadoras na ativação de respostas de defesa em cultivares de algodão sob restrição hídrica. Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizado (DBC), em esquema fatorial $3 \times 4 \times 2$, composto por três cultivares de algodão (FM 970 GLTP RM, FM 911 GLTP e FM 974 GL), quatro tratamentos sinalizadores [pulverização com água destilada (controle negativo), ácido salicílico (AS), melatonina (MT) e peróxido de hidrogênio (PH)], e duas condições hídricas [controle bem irrigado (90% da capacidade de campo – CC) e déficit hídrico (50% da CC)], com quatro repetições. Aos 20 dias após aplicação dos tratamentos hídricos, foram observados efeitos negativos no crescimento, parâmetros fisiológicos e bioquímicos em plantas estressadas pela seca. No entanto, o ácido salicílico foi capaz de mitigar os danos causados pelo estresse em plantas sensíveis ao FM 911, melhorando a área foliar, o crescimento das plantas e a tolerância relativa ao estresse. O desempenho superior das plantas FM 911 tratadas com AS foi associado a maiores trocas gasosas juntamente com atividades das enzimas G-POD e APX, que diminuíram a peroxidação lipídica. Sob estresse, a cultivar FM 970 tolerante mostrou-se responsiva aos sinalizadores MT e PH, pois apresentou maior número de botões florais, trocas gasosas e conteúdo de pigmentos fotossintéticos e ajuste osmótico, enquanto a cultivar FM 974 mostrou-se

pouco responsiva as moléculas sinalizadoras. Como conclusão, os resultados evidenciam que o AS exógeno alivia os danos causados pelo déficit hídrico no crescimento da cultivar FM 911, resultado da maior eficiência fotossintética e potencial antioxidante. Além disso a cultivar de algodão FM 970 tolerante ao déficit hídrico apresenta respostas fisiológicas relevantes sob tratamentos com ácido salicílico, melatonina e peróxido de hidrogênio, sem melhoria no crescimento das plantas.

Palavras-chave: Sinalização, aclimação, tolerância ao estresse, respostas fisiológicas, restrição hídrica.

5.1 Introdução

O algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é uma cultura globalmente importante, responsável por 35% da produção mundial de fibras e óleos, cultivada em mais de 100 países (ZAFAR et al., 2023). Entretanto, o cultivo de algodão no bioma cerrado do Brasil enfrenta diversos desafios climáticos, tais como altas temperaturas, períodos de estiagens e chuvas irregulares (SANTOS et al., 2020; KHATTAK et al., 2023). Embora o algodoeiro apresente bom desempenho sob condições estressantes, as constantes alterações ambientais promovem limitações significativas no crescimento e produtividade, com estimativas de perdas na ordem de até 67% de rendimento e uma redução de 73% na produção global de algodão (OZTURK et al., 2021).

A escassez de água é um fator crucial que limita o rendimento das culturas e a produção agrícola. Os danos causados pela limitação hídrica impõem obstáculos no metabolismo vegetal, como respiração, fotossíntese, controle estomático, divisão celular, para, posteriormente, limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas. De forma secundária, o déficit hídrico prolongado leva a perturbações nos centros produtores de energia, mitocôndria, cloroplastos e peroxissomos, resultando na produção e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) que provocam danos oxidativos em lipídios, proteínas e DNA, levando à morte celular programada (OMIDBAKHSHFARD et al., 2020).

Sob condições estressantes, as plantas ativam mecanismos de defesa, que podem incluir alterações morfológicas, expressão de genes, ativação de rotas metabólicas, entre outros processos (YANG et al., 2021). A síntese de hormônios, vias de sinalização e substâncias osmoreguladoras compõem as rotas de defesa contra o déficit hídrico, destacando-se o ácido abscísico (ABA), Ca^{2+} , manitol, trealose (Tre), D -inositol e sorbitol, e β -alanina, betaína, poliaminas (PAs) e propionato de dimetil-sulfônio, osmólitos compatíveis, proteínas, carboidratos solúveis, aminoácidos livres, glicina, betaína e prolina (OZTURK et al., 2021).

A defesa contra o estresse oxidativo envolve mecanismos complexos de desintoxicação, tanto enzimáticos quanto não enzimáticos. Enzimas antioxidantes, como glutatona peroxidase (GPX), superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), desempenham papéis cruciais, em associação com os antioxidantes não enzimáticos, como glutatona, ascorbato, carotenoides e flavonoides, dessa forma a ativação eficiente das rotas antioxidantes está associada a tolerância ao estresse em várias espécies de plantas (QAMER et al. 2021).

A vasta diversidade de rotas de defesa evidencia que a tolerância ao déficit hídrico compreende múltiplos genes e vias de sinalização celular. Assim, para a modulação morfofisiológica e molecular, as células vegetais ao perceberem sinais de estresse, desencadeiam mecanismos de sinalização, seguido por transdução para ativação de respostas. A ativação eficaz das respostas leva à redução dos danos e à recuperação do crescimento, visando minimizar os impactos da seca. (MAHMOOD et al., 2019).

Nos últimos anos, o emprego de moléculas sinalizadoras exógenas, para indução de tolerância cruzada, tem se mostrado uma estratégia importante para o aumento da tolerância das plantas ao estresse (KERCHEV et al., 2020). A pulverização com compostos como ácido salicílico, ácido jasmônico, brassinosteróides, melatonina, poliaminas, prolina e H_2O_2 , têm sido investigadas como indutores das respostas de defesa em cultivos de importância agrícola.

No algodoeiro, a aplicação de melatonina exógena promoveu retardo da floração, envelhecimento das folhas, crescimento de raízes laterais, desenvolvimento de folhas e cápsulas, e aumentou a capacidade de recuperação das plantas sob estresse (KHATTAK et al., 2022). Os autores relataram que as plantas tratadas com melatonina promoveram ajustes na fotorrespiração, metabolismo de carboidratos e nitrogênio, e na degradação da sacarose, otimizando

a eficiência da maquinaria fotossintética. Em outras espécies de plantas, o emprego de ácido salicílico exógeno promoveu a ativação de mecanismos de defesa, que proporcionou melhorias na fotossíntese, crescimento e desenvolvimento vegetal, e aumentou a tolerância a diversos estresses (SONG et al., 2023). Já a aplicação exógena de H_2O_2 , em plantas estressadas, alterou diversos processos fisiológicos (equilíbrio osmótico, teor relativo de água nas folhas, condutância estomática, transpiração, taxa de assimilação de CO_2 e eficiência instantânea da carboxilação da rubisco) e bioquímicos (modulação de metabólitos, defesa antioxidante, síntese de clorofila) e resultou no aumento do crescimento e de parâmetros produtivos (SILVA et al., 2021; SILVA et al., 2022; JIRA-ANUNKUL; PATTANAGUL, 2021).

Ao longo da evolução, a cultura do algodão desenvolveu inúmeras estratégias morfofisiológicas para lidar com o déficit hídrico, desde ajustes na eficiência fotossintética, status hídrico a morfologia de folhas e raízes (ZAHID et al., 2021). No entanto, pouco se sabe sobre o acionamento das respostas de defesa do algodoeiro frente à eventos de tolerância cruzada mediada por agentes sinalizadores.

O presente estudo investigativo foi conduzido para testar a hipótese que a aplicação de agentes sinalizadores promove ajustes fisiológicos e bioquímicos para o melhor desempenho de cultivares de *G. hirsutum* L. sob déficit hídrico. A hipótese foi testada através da pulverização foliar de indutores químicos exógenos (ácido salicílico, metatonina e peróxido de hidrogênio) em três cultivares com característica contrastantes ao déficit hídrico. Parâmetros de crescimento e indicadores fisiológicos e bioquímicos foram examinados para elucidar a respostas de defesa da planta à restrição hídrica.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Área experimental, condições de cultivo e tratamentos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e as análises foram realizadas em do Laboratório de Propagação de Plantas, ambos da Universidade

Federal do Piauí, no Campus Professora Cinobelina Elvas (UFPI/CPCE), localizado em Bom Jesus/PI, sob as coordenadas geográficas 9°04'46" S e 44°19'38 " W.

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema fatorial $3 \times 4 \times 2$, composto por três cultivares de algodão (FM 970 GLTP RM, FM 911 GLTP e FM 974 GL, tolerante, sensível e parcialmente tolerante, respectivamente), quatro sinalizadores [pulverização com água destilada (controle negativo), ácido salicílico, melatonina e peróxido de hidrogênio], sob duas condições hídricas [controle bem irrigado (90% da CC) e déficit hídrico (50% da CC)], com quatro repetições.

Durante os ensaios, amostras de um latossolo amarelo distrófico foram inicialmente coletadas da camada de 0-20 cm e submetidas a análise química. Em seguida, o solo foi utilizado para preencher vasos com capacidade de 11 L. Ajustes no pH e correções dos nutrientes do solo foram realizados conforme necessário, com base na saturação por base indicada na análise do solo, seguindo as recomendações para o cultivo do algodão (SOUSA; LOBATO, 2004).

As cultivares de algodão foram selecionadas com base nos resultados de experimentos prévios conduzidos com seis variedades de algodão e quatro regimes hídricos (conforme descrito no capítulo 2). A semeadura foi realizada manualmente com cinco sementes por vaso. Em seguida, foram realizados desbastes aos 7 e 14 dias após a semeadura (DAS) para manter uma planta por vaso. Ao longo dos 30 primeiros dias de experimentos, fase fenológica vegetativa, as plantas foram irrigadas diariamente para manter a umidade do solo equivalente a 90% da CC, ocasião que se aplicou os tratamentos com diferentes regimes hídricos.

As moléculas químicas foram aplicadas via pulverização foliar em um volume total de 10 mL, diluída em água destilada contendo Triton X 100 a 0,05%, que foi parcelado em duas aplicações realizadas a 48 h e 24 h antes da aplicação dos tratamentos hídricos. As concentrações de ácido salicílico (1500 μ M) (BARROS et al., 2019), melatonina (200 μ M) (HU et al., 2020; JIANG et al., 2020, 2021) e peróxido de hidrogênio (1000 μ M) (ISHIBASHI, 2011) foram definidas com base em informações disponíveis na literatura. O tratamento controle negativo consistiu na pulverização das folhas com água destilada contendo Triton X-100.

5.2.2 Manejo da irrigação

A aplicação dos diferentes regimes hídricos aconteceu quando as plantas atingiram 30 DAS. O manejo da irrigação foi realizado pelo método de pesagem de vasos, com base na capacidade de campo, após saturação do solo por 24 horas, seguindo Xu et al. (2009). Os vasos foram pesados diariamente em balança eletrônica para monitorar a perda de água por evapotranspiração e reposição da quantidade necessária de água para atingir os regimes de umidade do solo pré-estabelecidos de 90 e 50% da CC (SILVA et al., 2023). Os regimes de irrigação foram mantidos por 20 dias até as plantas iniciarem a fase de floração, momento de coleta do material vegetal.

5.2.3 Área foliar, dados biométricos, massa fresca e seca, e tolerância relativa ao estresse

Ao longo do experimento foram feitas mensurações biométricas, como altura de planta, número de nós, diâmetro do caule e número de botões flores. Durante a coleta, as plantas foram divididas em folhas, caules e raízes, determinando-se inicialmente a área foliar (AF) com o auxílio de um medidor de área foliar (medidor de área modelo LI-3100C, LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EUA). Em seguida, determinou-se a massa fresca dos órgãos constituintes e o material vegetal foi colocado em estufa com circulação forçada a 60 °C, durante três dias, para completa secagem e determinação da massa seca. O índice de tolerância relativa ao estresse foi calculado considerando a massa seca total das plantas estressadas comparada à massa seca das plantas controle, seguindo adaptações de Miranda et al. (2021) e Silva et al. (2023).

5.2.4 Teor relativo de água, suculência foliar, potencial osmótico e temperatura foliar

O teor relativo de água (TRA) foi determinado utilizando discos foliares de 1,0 cm² de diâmetro, segundo Čatský (1960) por meio da seguinte equação:

$$\text{TRA (\%)} = [(MF-MS) / (MT-MS)] \times 100.$$

em que: MF= massa fresca; MS= massa seca; MT= massa turgida.

A suculência foliar (SF) foi determinada utilizando metodologia adaptada de Mantovani (2011) por meio da seguinte fórmula:

$$\text{SF (g H}_2\text{O cm}^{-2}\text{)} = (\text{MFF} - \text{MSF}) / \text{AF}$$

em que: MFF = massa fresca da folha; MSF = massa seca da folha; LA = área foliar.

Para determinação do potencial osmótico (Ψ_s), inicialmente foi extraído o sulco límpido de folhas por meio de prensagem, seguida de leitura da osmolaridade em um micro-osmômetro (Vapor Pressure Osmometer, modelo 5600, Wescor, Utah, EUA). Posteriormente, os valores de Ψ_s foram obtidos através da equação de Van't Hoff (BAO et al., 2014):

$$\Psi_s (\pi) = - R \times T \times C$$

onde R = constante universal dos gases (0,00831 kg MPa mol⁻¹ K⁻¹); T = temperatura em Kelvin; C = concentração do soluto.

A temperatura foliar foi mensurada na primeira folha completamente expandidas com o auxílio de uma câmera térmica no infravermelho (modelo FLIR TG165), entre 11:30 e 12:00h em dias completamente ensolarados.

5.2.5 Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a

Os parâmetros de trocas gasosas e da fluorescência da clorofila a foram mensurados na primeira folha completamente expandida utilizando um analisador de gases infravermelho (IRGA, Walz – GFS3000) com fluorômetro acoplado, entre 08:00 h e 11:00 h, em dias completamente ensolarados. Os parâmetros analisados incluíram fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e concentração interno de CO₂ (Ci). De posse dos dados, estimou-se também a

eficiência de carboxilação da Ribulose-1,5- bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) (A/C_i), eficiência intrínseca do uso da água (A/g_s) e eficiência instantânea no uso da água (A/E).

Para obtenção dos dados de fluorescência, as leituras foram realizadas após 30 minutos de pré-adaptação das plantas ao escuro. Inicialmente foram analisadas a fluorescência máxima (F_m) e variável (F_v) no escuro; fluorescência máxima (F_m') e no equilíbrio dinâmico (F_s) na presença de luz; fluorescência basal (F_o); densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD). De posse dos dados, calculou-se as seguintes variáveis: eficiência quântica potencial do fotossistema II (F_v/F_m); eficiência quântica efetiva do fotossistema II ($\Delta F/F_m'$ ou $\phi PSII$); coeficiente de extinção fotoquímica da fluorescência [$qP=(F_m'-F_s)/(F_m'-F_o)$]; coeficiente de extinção não fotoquímica da fluorescência [$NPQ=(F_m-F_m')/F_m'$]; e a taxa aparente de transporte de elétrons ($ETR = \phi PSII \times PPFD \times 0,5 \times 0,84$).

5.2.6 Pigmentos fotossintéticos e antocianinas

A extração dos pigmentos fotossintéticos, incluindo clorofila a ($Clf\ a$), b ($Clf\ b$) e total ($Clf\ total$), bem como carotenóides, foi realizada incubando discos foliares em solução de dimetilsulfóxido (DMSO) saturada com $CaCO_3$ no escuro. Os teores dos pigmentos foram determinados com base em leituras de absorbância a 665, 649 e 480 nm, aplicando-se as fórmulas propostas por Wellburn (1994). Para a extração de antocianinas, incubou-se discos foliares em uma solução de extração composta por ácido clorídrico (HCl), água (H_2O) e metanol (CH_3OH) na proporção de 1:3:16, durante 24h, sob agitação constante, a temperatura ambiente. Em seguida, as concentrações foram determinadas com base em leituras espectrofotométricas a 530 e 653 nm, aplicando a fórmula proposta por M'rah-Helali et al. (2010).

5.2.7 Teores de lignina

A extração da lignina foi realizada a partir da maceração raízes liofilizadas e lavadas em água e etanol. Após o procedimento de lavagem e secagem, cerca de

100 mg do material foi incubado com ácido tioglicólico e ácido clorídrico, em agitador orbital por 48h. Ao final, realizou-se lavagens no material, o qual passou por processo de precipitação e resuspensão com NaOH a 2 M. Os teores de lignina foram estimados por meio de leituras de absorbância a 280 nm por meio de comparação com uma curva padrão elaborada com concentrações crescentes de solução padrão (BARBER; RIDE, 1988; HATFIELD; FUKUSHIMA, 2005).

5.2.8 Peroxidação de lipídeos de membrana e peróxido de hidrogênio

A avaliação da peroxidação lipídica nos tecidos foliares foi conduzida pela quantificação da produção de malondialdeído (MDA), um subproduto desse processo. Em resumo, 300g do material foliar fresco foram triturados em nitrogênio líquido e, em seguida, o homogeneizado resultante foi submetido à reação com ácido tiobarbitúrico. As leituras de absorbância foram realizadas a 532 nm e 600 nm (HEATH; PACKER, 1968), e os teores de MDA foram calculados utilizando o coeficiente de extinção molar ($\epsilon = 0,155 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) foi extraído de tecidos foliares com maceração em nitrogênio líquido, seguido de homogeneização em ácido tricloroacético, contendo KCN a 5 mM, seguindo a metodologia de Cheeseman (2006) com modificações. A mistura de reação foi composta por alíquotas do extrato, tampão fosfato de potássio a 10 mM, e iodeto de potássio a 1,0 M (ALEXIEVA et al., 2001). Os teores de H_2O_2 foram mensurados através de leituras de absorbância a 390 nm, por meio de comparação com uma curva padrão elaborada com concentrações crescentes de peróxido de hidrogênio.

5.2.9 Atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidante

Extratos brutos foram preparados a partir de massa fresca de folhas em tampão fosfato de potássio pH 7,0 a 50 mM, conforme metodologia descrita por (ROSA et al., 2021). De posse do extrato, estimou-se os teores de proteínas solúveis

totais de acordo com Bradford (1976). A peroxidase do ascorbato (APX) foi mensurada seguindo o método descrito por Nakano e Asada (1981), enquanto os ensaios para estimar a atividade da peroxidase do guaiacol (G-POD) foram realizados segundo Kar e Mishra (1976).

5.2.10 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) através do teste F com nível de significância de 5%. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), utilizando o *software R* (R Development Core Team, 2016) para análise de dados e o *software SigmaPlot Version 15.0* (SYSTAT SOFTWARE, 2006). para geração de gráficos.

5.3 Resultados

5.3.1 Ensaio de crescimento

5.3.1.1 Dados biométricos

De maneira geral, o déficit hídrico promoveu reduções na área foliar, altura, diâmetro do caule, número de nós e comprimento da raiz em todas as cultivares, independentemente do tratamento sinalizador, quando comparadas com as plantas do grupo controle (Figura 8 e 9). Ao observar o comportamento das cultivares sob estresse na ausência de sinalizadores (CN), observou-se que a cultivar FM 974 apresentou maiores valores de área foliar, em relação às demais cultivares estudadas (Figura 9a, b). Contudo, benefícios dos tratamentos com sinalizadores sob estresse só foram evidentes para a área foliar da cultivar FM 911 sob aplicação

de AS, e PH para número botões florais da cultivar FM 970, que mostraram valores maiores que àqueles de plantas não tratadas (CN).

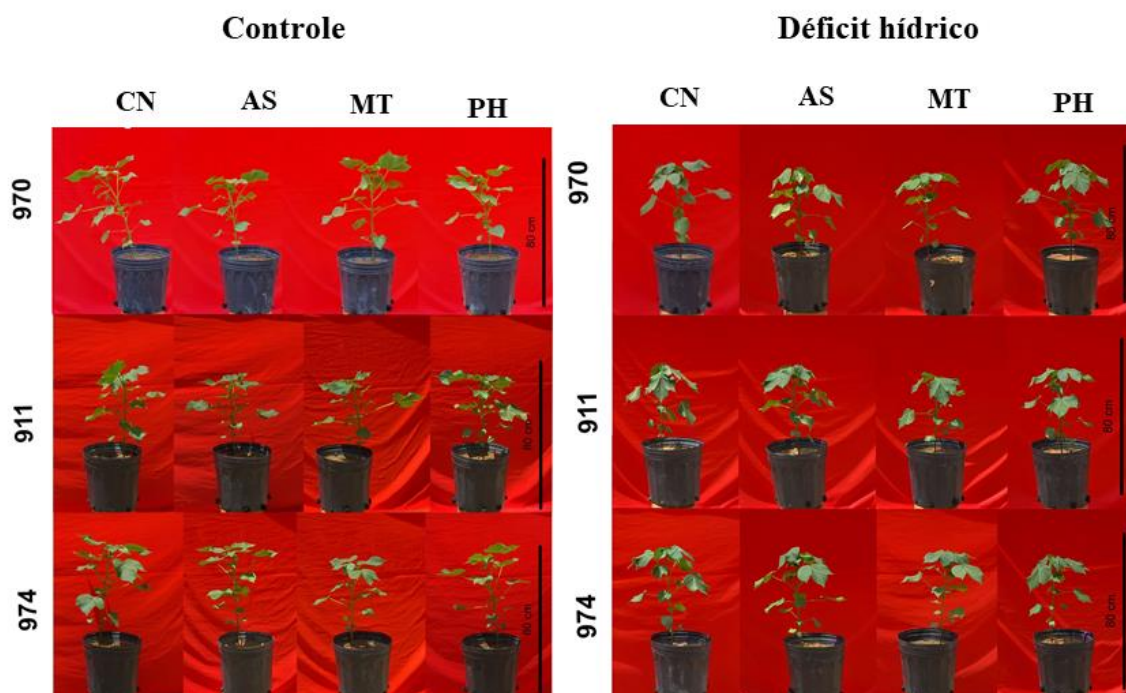


Figura 8 - Desenvolvimento em altura de plantas em cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) cultivadas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT – melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.3.1.2 Biomassa

No presente estudo, observou-se comportamento similar entre o acúmulo de biomassa fresca e seca em função dos tratamentos estudados (Figuras 10 e 11). Em todos os casos, a restrição hídrica promoveu reduções significativas nos parâmetros de massa fresca e seca das folhas, caule, raízes e total, em todas as cultivares, independente do tratamento sinalizador, com poucas exceções. Na ausência de

sinalizador e sob déficit hídrico, os efeitos negativos do estresse foram menos acentuados na cultivar FM 911, com menores percentuais de redução em comparação ao respectivo controle. Adicionalmente, sob limitação hídrica, não foram observadas alterações significativas em função dos tratamentos com sinalizadores, independente da cultivar estudada.

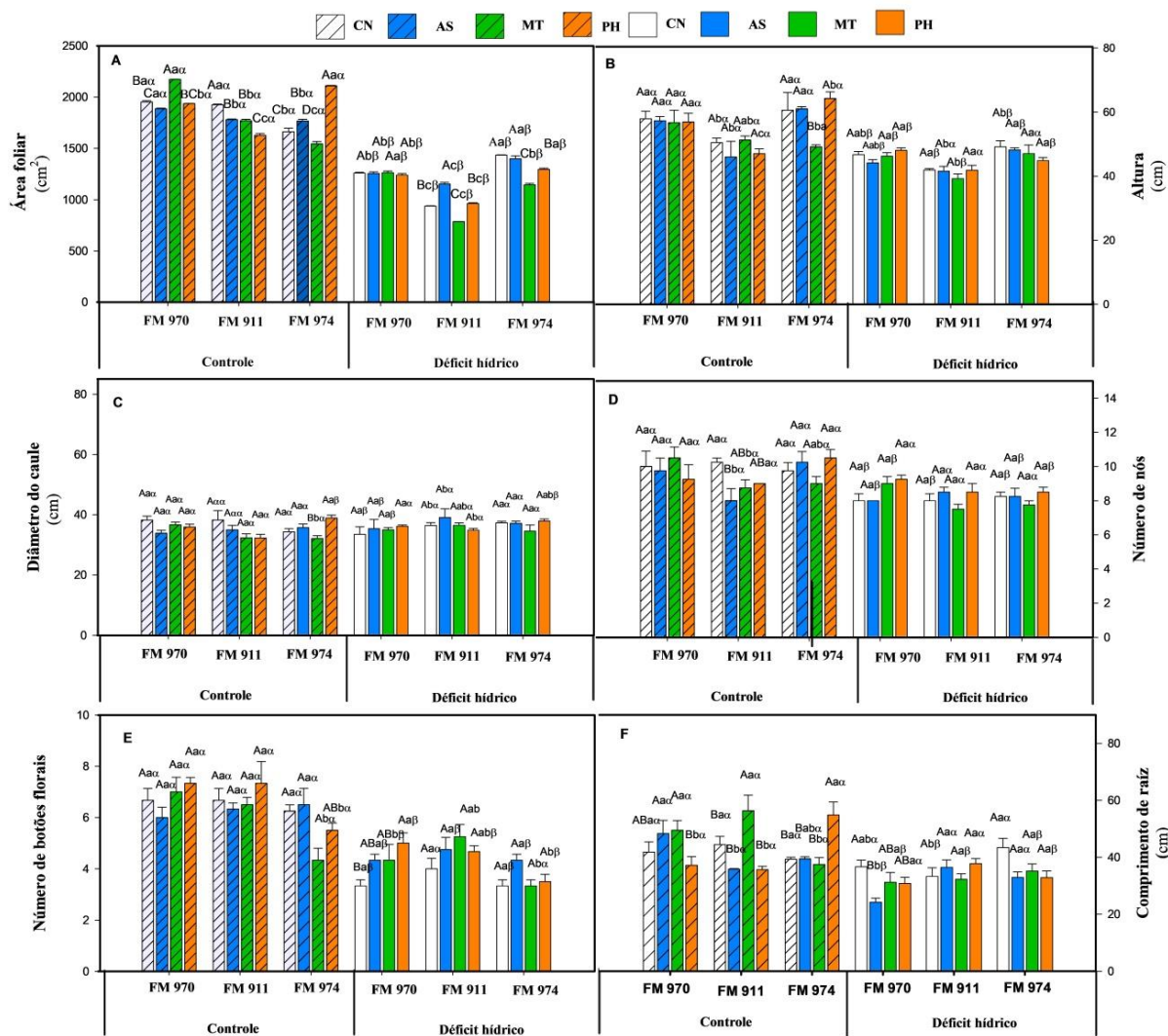


Figura 9 - Área foliar (A), altura (B), diâmetro do caule (C), número de nós (D), número de botões florais (E), comprimento de raiz (F), de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) cultivadas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT - melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sob déficit hídrico, as plantas mostraram reduções nos valores de tolerância relativa ao estresse, em todas as cultivares, quando comparadas com plantas bem irrigadas (Figura 11e). Notavelmente, na ausência de sinalizador, ao avaliar o desempenho das cultivares sob déficit hídrico, observou-se que a maior tolerância ao estresse foi apresentada pela cultivar FM 970, em comparação às demais estudadas. Além disso, efeitos benéficos dos tratamentos com sinalizadores em plantas estressadas só foram registrados na cultivar FM 911 tratadas com AS, que apresentou maior tolerância que plantas tratadas com água (CN). Intrigantemente, as cultivares mais tolerantes (FM 970 e FM 974) não demonstraram resposta significativa a nenhum sinalizador estudado.

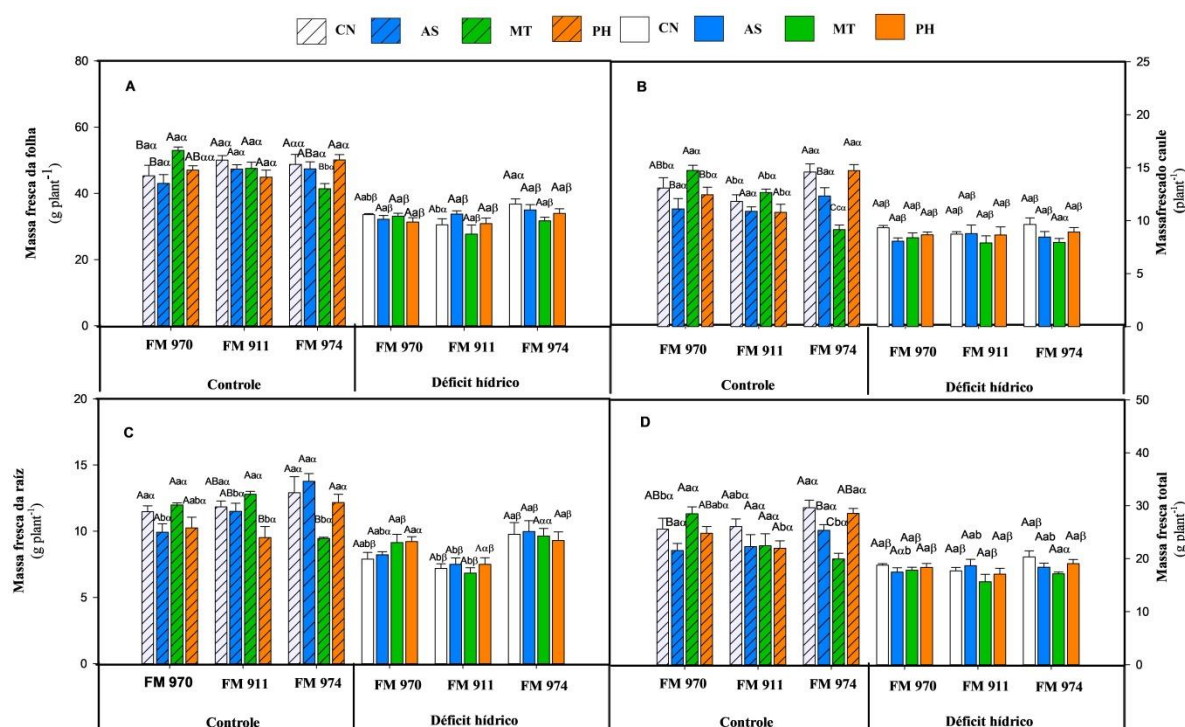


Figura 10 - Massa fresca da folha (A), caule (B), raízes (C) e total (D) de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) cultivadas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT – melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

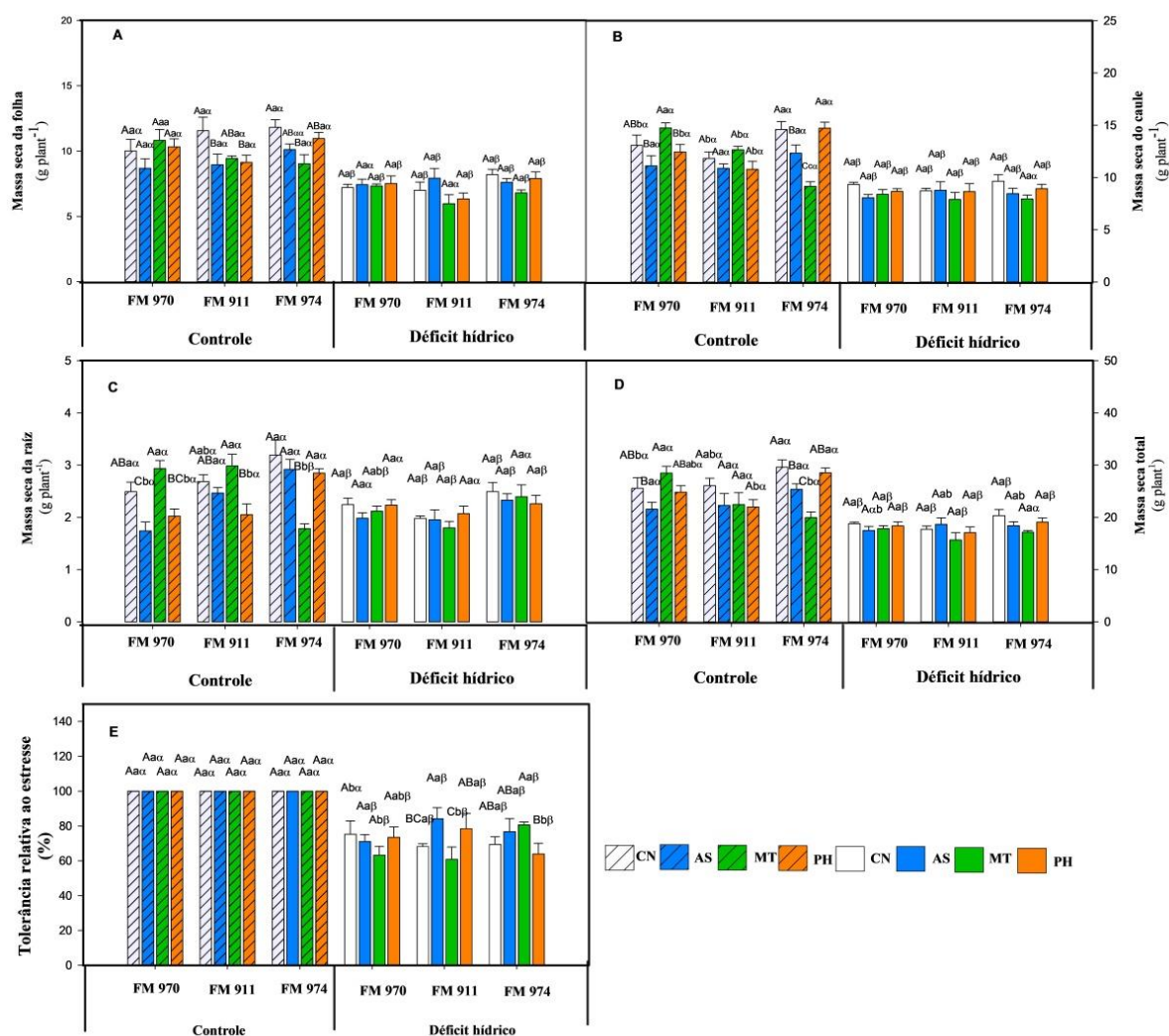


Figura 11 - Massa seca da folha (A), caule (B), raízes (C), total (D) e tolerância relativa ao estresse (E) de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) cultivadas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT - melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.3.2 Ensaios fisiológicos

5.3.2.1 *Suculência foliar, teor relativo de água, potencial osmótico e temperatura foliar*

As variáveis relacionadas ao status hídrico das plantas apresentaram alteração diferencial em função dos tratamentos e cultivares estudadas (Figura 12). De modo similar, plantas sob déficit hídrico mostraram reduções na suculência foliar e no potencial osmótico em comparação aos respectivos controles bem irrigados, ao passo que pouca ou nenhuma alteração foi observada no teor relativo de água em função do regime hídrico (Figura 12b). As reduções na suculência pelo déficit hídrico foram mais intensas nas plantas FM 911 (sensível), na ausência de tratamento com sinalizador, o que foi acompanhada por maiores decréscimos no potencial osmótico (Figura 12a, c). Em adição, alterações decorrentes dos tratamentos com sinalizadores, em plantas estressadas, foram registradas apenas no potencial osmótico da cultivar FM 970, em que a pulverização com MT e PH intensificou a redução do potencial osmótico em comparação ao controle negativo pulverizado com água (Figura 12c), e na cultivar FM 974 quando pulverizada com PH.

Os dados demonstraram que, de modo geral, as plantas de algodão mantiveram a temperatura foliar praticamente estável, e que não houve variação em função do déficit hídrico, porém foram observadas poucas alterações em algumas plantas do controle bem irrigado pelos tratamentos com sinalizadores (Figura 12d).

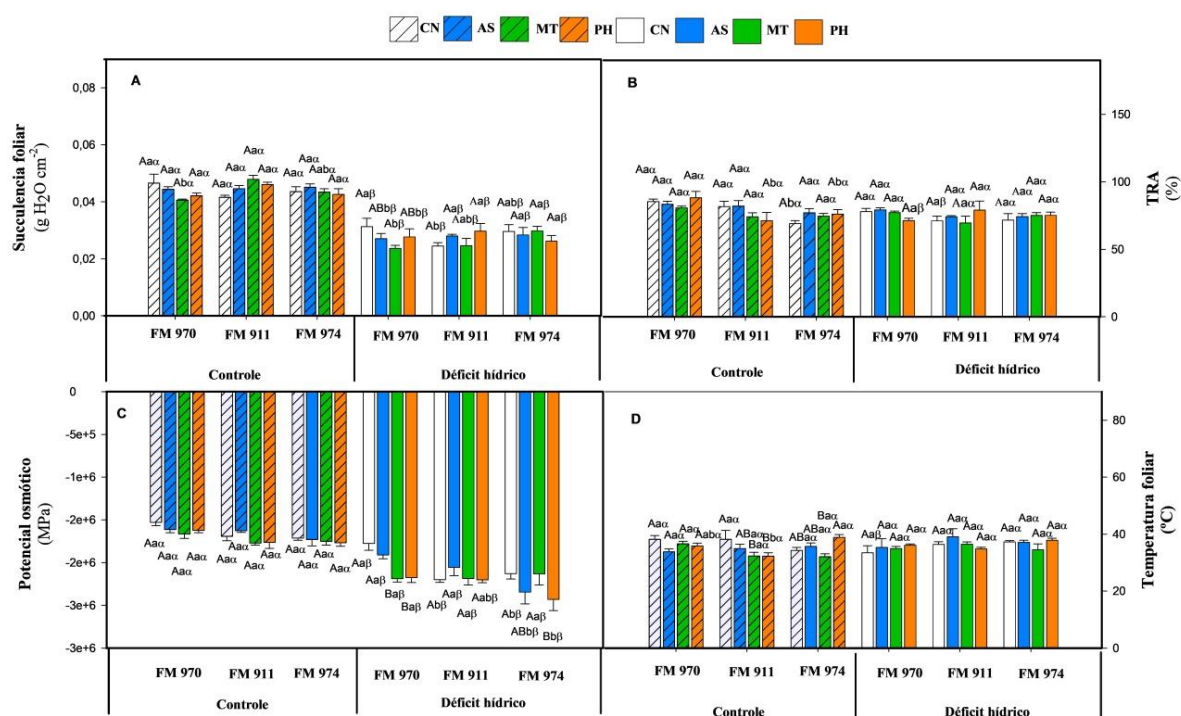


Figura 12 - Suculência (A), teor relativo de água (B), potencial osmótico (C) e temperatura foliar de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) crescidas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT – melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.3.2.2 Trocas gasosas

As trocas gasosas das plantas de algodão foram reguladas de modo distinto em função dos tratamentos estudados, com destaque para o efeito mitigador do sinalizadores em especial para a cultivar FM 970 (Figura 13). De maneira similar, as taxas de fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E), e concentração interna de CO_2 (C_i) foram reduzidas drasticamente pelo déficit hídrico em comparação ao controle bem irrigado, exceto para a A da cultivar FM 970 sob pulverização com AS, MT e PH e para A , g_s e E da cultivar FM 974 tratada com PH

(Figura 13a, b, c, d). Na ausência de pulverização com sinalizadores (controle negativo), as reduções nas taxas de A , g_s e E foram menos intensas nas plantas estressadas da cultivar FM 974, que mostrou valores superiores àqueles das demais cultivares estudadas.

Os resultados demonstraram que os tratamentos com AS, MT e PH foram eficientes em aliviar os danos do déficit hídrico nas trocas gasosas das plantas FM 970, promovendo importantes incrementos nas taxas de A , g_s e E em relação ao controle negativo (pulverização com água), o que resultou na maior eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i) (Figura 13e). De forma menos expressiva, a cultivar FM 911 também se mostrou responsiva aos tratamentos com sinalizadores pois, sob déficit hídrico, o tratamento com PH aumentou as taxas de A , g_s e E em comparação ao respectivo controle negativo (Figura 13a, b, c). Já a cultivar FM 974 não foi responsiva aos tratamentos com os sinalizadores estudados no aumento da A/C_i .

Os resultados revelaram que todas as cultivares de algodão apresentaram tendência de aumentar a eficiência do uso da água intrínseca (A/g_s - EUA_{intri}) e instantânea (A/E - EUA_{inst}) quando expostas ao déficit hídrico, em comparação ao controle bem irrigado (Figura 13f, g). Contudo, sob limitação hídrica, alterações decorrentes dos tratamentos com sinalizadores foram observadas apenas nas plantas FM 974, que apresentaram incrementos na EUA_{intri} e EUA_{inst} quando pulverizadas com AS e MT em relação àquelas estressadas e pulverizadas com água destilada (controle negativo).

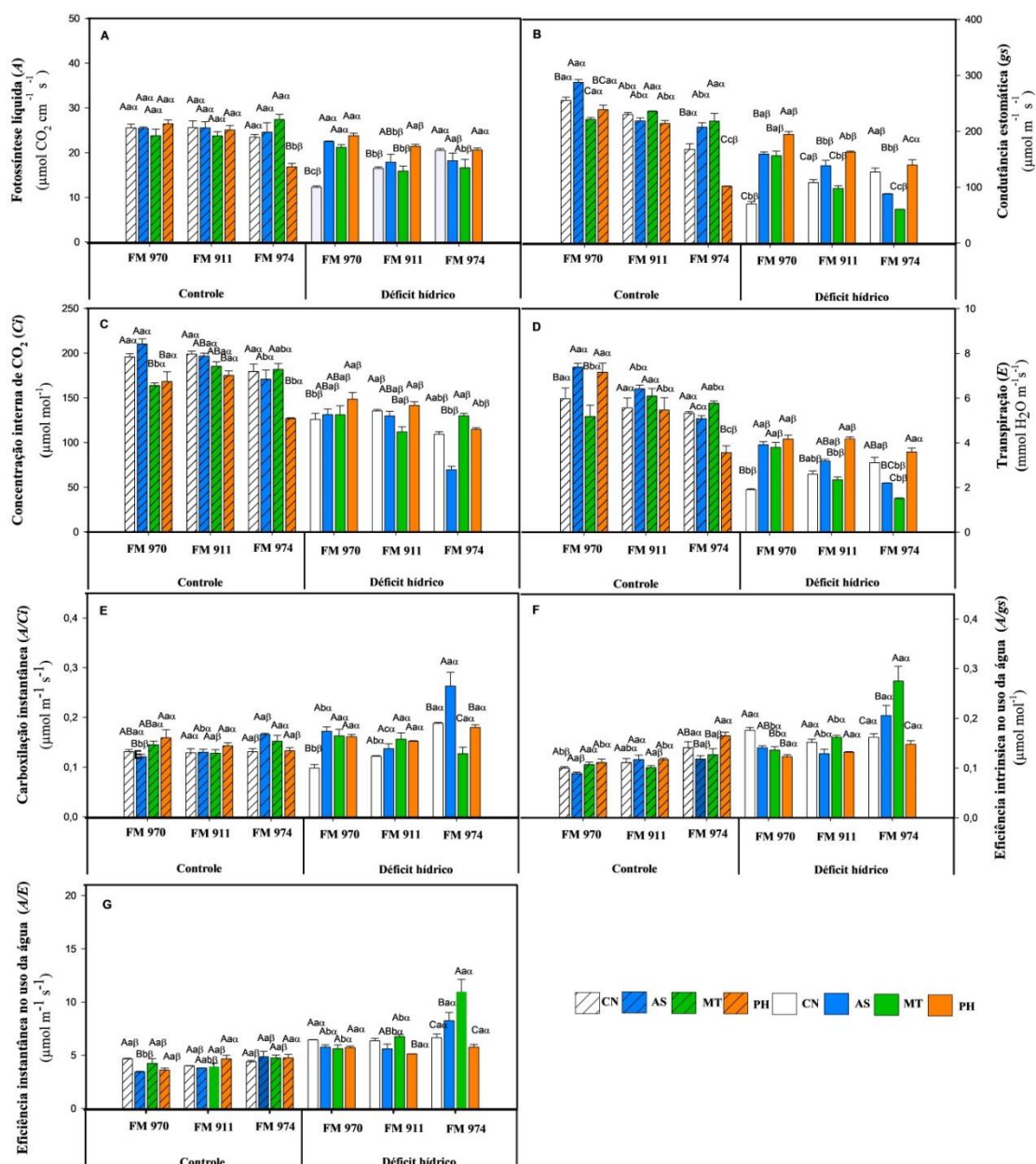


Figura 13 - Taxa de fotossíntese líquida (A, A), condutância estomática (G_s , B), concentração interna de CO_2 (C_i , C), transpiração (E , D), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/C_i , E), e eficiências do uso da água intrínseca (A/g_s , F) e instantânea (A/E , G) de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) cultivadas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT - melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.3.2.3 Fluorescência da clorofila a

Na ausência da aplicação de sinalizador, os resultados demonstraram que as plantas de algodão não apresentaram alterações significativas nos parâmetros de fluorescência da clorofila a em função do déficit hídrico (Figura 14), com exceção da dissipação não fotoquímica (NPQ), que foi reduzida sob condições restritas de água (Figura 14d). Em alguns casos, plantas estressadas e pulverizadas com AS, MT e PH mostraram maiores valores de eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII) e taxa de transporte de elétrons (ETR) que os respectivos controles bem irrigados; contudo, não houve diferenças significativas quando comparadas com plantas estressadas e pulverizadas com água (controle negativo) (Figura 14b, e).

5.3.2.4 Pigmentos fotossintéticos

Sob condições bem irrigadas, plantas FM 970 do tratamento controle negativo (pulverizadas com água) mostraram maiores teores de clorofila a (Clf a), clorofila b (Clf b), clorofila total (Clf total) e carotenoides maiores que as plantas das demais cultivares estudadas (Figura 15a, b, c, d). As plantas desse tratamento, em conjunto com plantas FM 974 tratadas com MT, foram as únicas a apresentar reduções significativas pelo déficit hídrico nos teores dos pigmentos fotossintéticos, em relação aos respectivos controles. Além disso, sob déficit hídrico, os tratamentos com MT e PH promoveram incrementos nos teores de todos os pigmentos fotossintéticos de plantas FM 970, em comparação ao controle negativo pulverizado com água.

De maneira geral, os teores de antocianinas das plantas estressadas foram maiores que aqueles de plantas bem irrigadas, independente da cultivar e do tratamento com sinalizadores (Figura 15e). Entretanto, não houve alterações significativas em decorrência da aplicação de AS, MT e PH nas plantas sob déficit hídrico, quando comparadas com plantas do controle negativo.

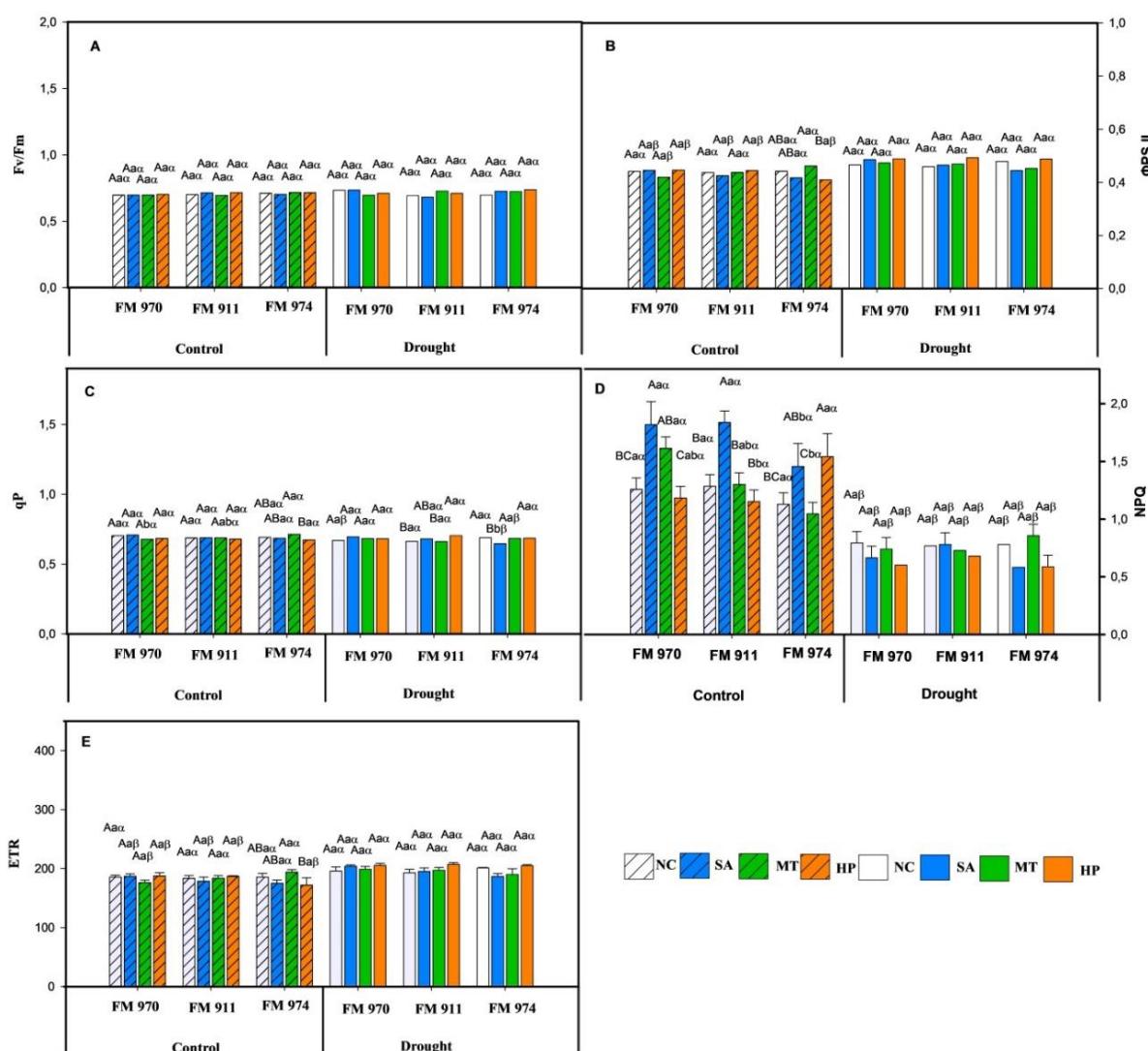


Figura 14 - Eficiência quântica máxima (Fv/Fm, **A**) e efetiva do fotossistema II (ΦPSII, **B**), dissipação fotoquímica (qP, **C**) e não fotoquímica (NPQ, **D**), e taxa de transporte de elétrons (ETR, **E**) de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) crescidas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT – melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey (p ≤ 0,05).

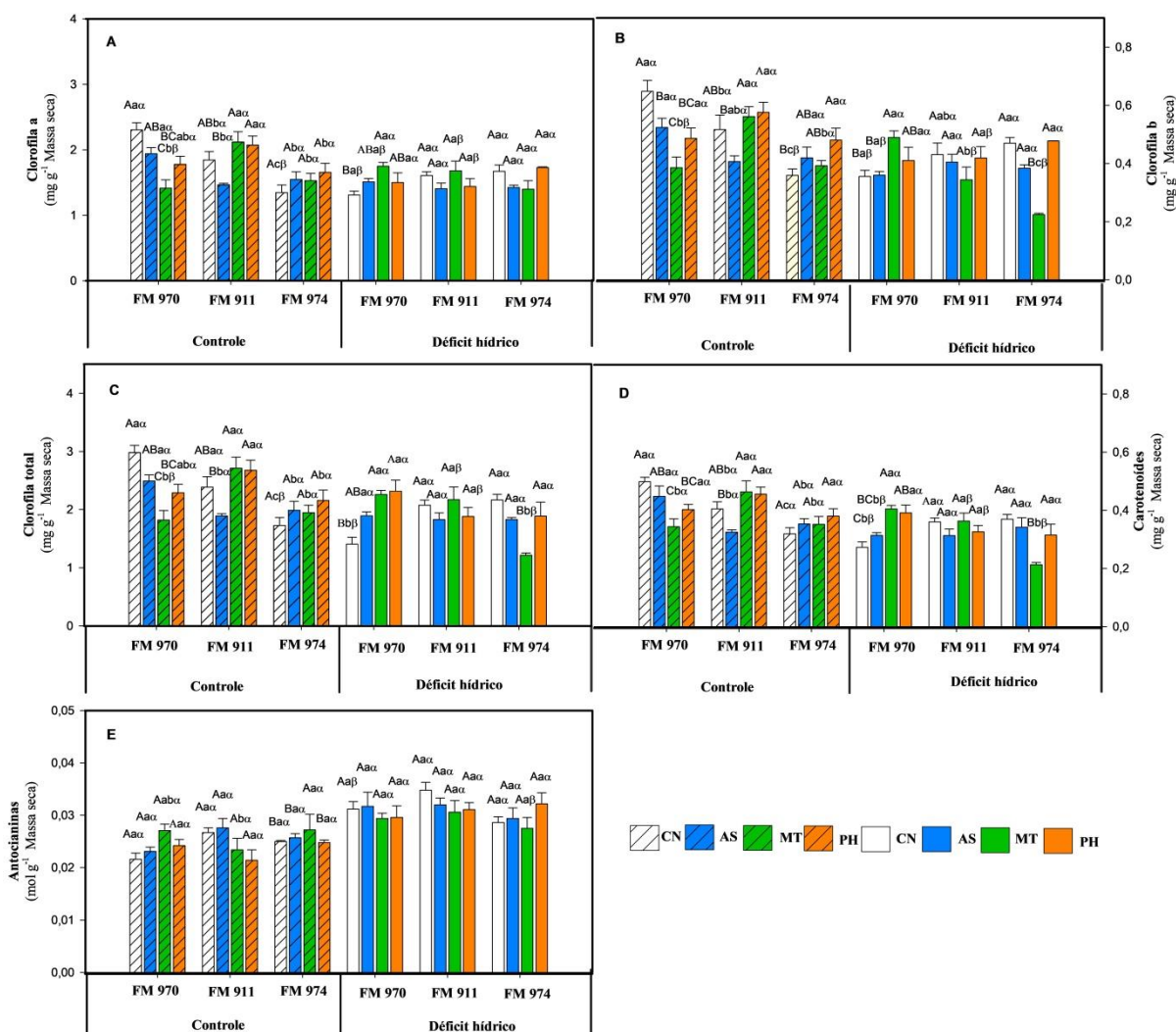


Figura 15 - Teores de clorofila a (Clf a, **A**), clorofila b (Clf b, **B**), clorofila total (Clf total, **C**), carotenoides (**D**) e antocianinas (**E**) de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) crescidas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT - melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.3.3 Ensaio bioquímicos

No presente estudo, os ensaios bioquímicos foram mensurados apenas nas cultivares (FM 970 e FM 911) que apresentaram respostas de crescimento e fisiológicas mais discrepantes sob déficit hídrico, com contraste nas respostas aos sinalizadores estudados.

5.3.3.1 *Lignina*

Sob condições bem irrigadas, sem pulverização com sinalizador, plantas FM 911 apresentaram maiores teores de lignina que plantas FM 970, enquanto o oposto foi observado sob déficit hídrico (Figura 16). Os tratamentos com AS, MT e PH aumentaram os teores de lignina nas plantas FM 970 bem irrigadas, ao passo que reduziram nas plantas FM 911, em comparação aos respectivos controles negativos. O oposto praticamente ocorreu nas plantas estressadas. As alterações decorrentes do déficit hídrico também foram distintas nas cultivares de algodão, pois, enquanto em alguns casos o déficit hídrico aumentou significativamente os teores de lignina, em outros promoveu reduções.

5.3.3.2 *Enzimas antioxidantes, peroxidação lipídica e atividade de H_2O_2*

No presente estudo, foi possível mensurar apenas a atividade das enzimas peroxidase do ascorbato (APX) e peroxidase do guaiacol (G-POD) (Figura 17a, b). Na ausência de aplicação dos tratamentos com sinalizadores (CN), observou-se que a atividade da APX foi mantida inalterada e reduzida nas plantas FM 970 e FM 911, respectivamente, quando expostas ao déficit hídrico. Em contraste, a G-POD apresentou incrementos em ambas as cultivares submetidas à limitação hídrica.

Um achado interessante é que os tratamentos com sinalizadores reduziram a atividade da APX e G-POD das plantas FM 970 sob déficit hídrico. Além disso, foram

observados aumentos significativos nas atividades de G-POD para todos os tratamentos com indutores, e incrementos na atividade da APX quando as plantas FM 911 estressadas foram tratadas com PH, em comparação aos respectivos controles negativos (Figura 17a, b).

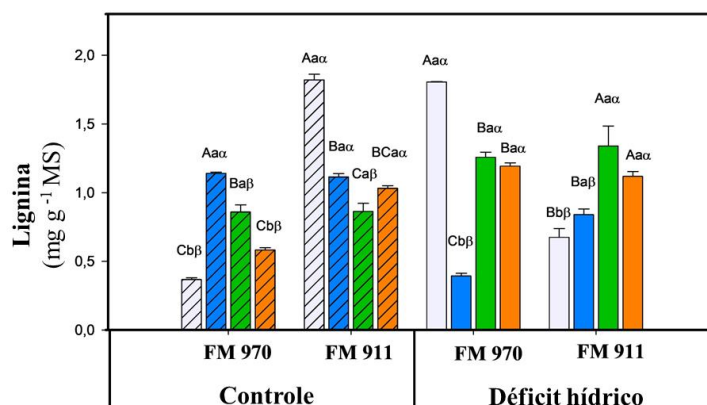


Figura 16 - Teores de lignina nas raízes de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) crescidas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT – melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os dados revelaram que, na ausência de sinalizadores, o déficit hídrico promoveu maiores danos de membrana (evidenciado pelos altos teores de MDA) na cultivar sensível ao estresse (FM 911) em comparação ao controle bem irrigado (Figura 17c). Contudo, sob aplicação dos sinalizadores MT e PH, as plantas FM 970 estressadas apresentaram incrementos nos teores de MDA em comparação ao controle negativo (Figura 17c). Por outro lado, plantas FM 911 estressadas apresentaram menores danos de membrana quando tratadas MT e PH, em relação ao controle negativo.

Sob condições bem irrigadas, plantas FM 970 apresentaram menores teores de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) que plantas FM 911, independente da dos tratamentos com sinalizadores (Figura 17d). O déficit hídrico promoveu incrementos

nos teores de H_2O_2 das plantas FM 970, enquanto o oposto ocorreu para plantas FM 911 em comparação a condição bem irrigada, exceto nos tratamentos com PH. No entanto, sob restrição hídrica, reduções nos teores de H_2O_2 pelos tratamentos com sinalizadores foram registradas apenas nas plantas FM 970 tratadas com PH, e não houve nenhuma alteração significativa nas plantas FM 911 (Figura 17b).

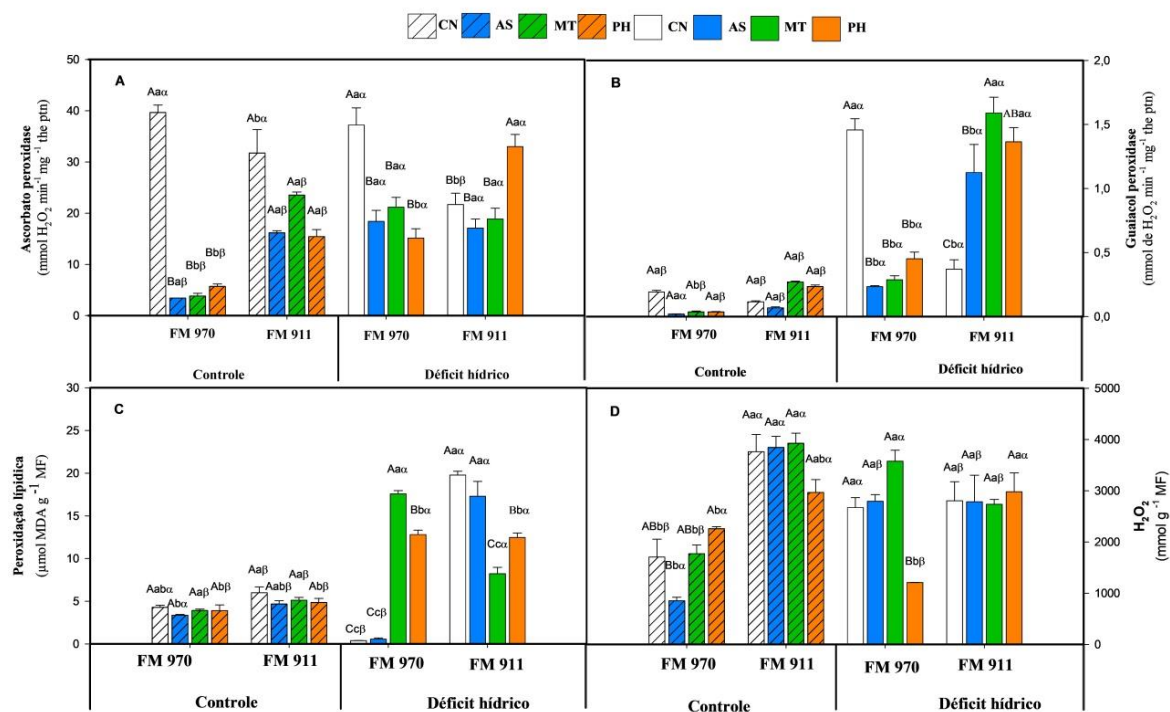


Figura 17 - Atividade das enzimas peroxidase do ascorbato (APX, **A**) e peroxidase do guaiacol (G-POD, **B**) Teores de malondialdeído/peroxidação lipídica (MDA, **C**) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , **D**) de cultivares de algodão (FM 911 GLTP, FM 970 GLTP RM, FM 974 GL) crescidas sob diferentes regimes hídricos (controle e déficit hídrico) e tratamentos com sinalizadores químicos (CN - controle negativo, AS - ácido salicílico, MT - melatonina, e PH - peróxido de hidrogênio). Letras maiúsculas comparam os tratamentos com sinalizadores dentro da mesma cultivar de algodão e regime hídrico. Letras minúsculas comparam as cultivares de algodão dentro do mesmo regime hídrico e tratamento com sinalizador. Letra grega compara os diferentes regimes hídricos na mesma cultivar e tratamento com sinalizador. Letras maiúsculas, minúsculas e gregas diferentes indicam diferença significativa de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

5.4 Discussão

Em um estudo prévio (Capítulo 2), investigou-se o desempenho de cultivares de algodão adaptadas ao cultivo no semiárido quanto ao cultivo sob diferentes regimes. Na ocasião selecionou-se cultivares com respostas contrastantes ao déficit hídrico, identificando processos fisiológicos relacionadas a defesa do algodoeiro. Como tolerante foi selecionada a cultivar FM 970, que apresentou melhores respostas quanto a eficiência fotossintética, ajuste osmótico e melhor eficiência no uso da água. Já como sensível foi empregada a cultivar FM 911 que se caracterizou por apresentar menor acúmulo de biomassa e maior peroxidação lipídica sob déficit hídrico. A cultivar FM 974 também chamou atenção e foi empregada neste estudo, pois, apesar de ter um bom crescimento e melhores acúmulos de pigmentos, apresentou valores de peroxidação lipídica altos, a caracterizando como parcialmente tolerante. No presente estudo, avaliou-se o papel do ácido salicílico (AS), melatonina (MT) e peróxido de hidrogênio (PH) como indutores de tolerância ao déficit hídrico em plantas de algodão.

5.4.1 O ácido salicílico exógeno alivia os danos do estresse sobre o crescimento da cultivar de algodão sensível ao déficit hídrico

Conforme relatado para várias espécies de plantas, a restrição hídrica reduziu significativamente o crescimento de todas as cultivares de algodão, tanto na ausência como na presença dos tratamentos com sinalizadores (Figuras 8, 9, 10, 11). Na maioria dos casos, os danos do estresse foram mais evidentes nas plantas FM 911, caracterizadas previamente como sensíveis à limitação hídrica (Capítulo 2). Evidências disso é que, na ausência da pulverização com sinalizadores, a maior tolerância ao estresse foi apresentada pela cultivar FM 970, em comparação às demais estudadas (Figura 11e). Os dados confirmam os achados prévios sobre a caracterização das cultivares quanto à tolerância e susceptibilidade à restrição hídrica.

Os resultados evidenciam que o papel benéfico dos tratamentos com sinalizadores, na mitigação dos danos do estresse, dependeu da cultivar estudada. Intrigantemente, as cultivares FM 970 e FM 974 não demonstraram resposta significativa a nenhum sinalizador estudado, tanto para as variáveis biométricas quanto para o acúmulo de biomassa (Figuras 9, 10, 11). De forma surpreendente, o ácido salicílico foi efetivo em mitigar os danos do déficit hídrico na cultivar FM 911, que mostrou recuperação na área foliar e outros parâmetros de crescimento, o que culminou na maior tolerância relativa ao estresse quando comparada a plantas estressadas e pulverizadas com água (controle negativo). Os dados estão de acordo com os estudos de Koo, Heo, Choi, (2020), que demonstraram os efeitos benéficos do AS como regulador de crescimento, evidenciando seu papel na indução de respostas antioxidantes.

5.4.2 Os agentes sinalizadores podem otimizar a eficiência fotossintética do algodoeiro sob restrição hídrica

Diversos estudos têm mostrado que, sob condições adversas, a manutenção dos teores de pigmentos fotossintéticos é crucial para a eficiência da maquinaria fotossintética, pois atuam na captura de luz para indução da fase fotoquímica e podem auxiliar na dissipação do excesso de energia (SIMKIN et al., 2022). Neste estudo, os resultados demonstraram que os teores de Clf a, Clf b, Clf total e carotenoides são reduzidos quando as plantas são submetidas ao déficit hídrico. Contudo, observou-se que a aplicação exógena de AS, MT e PH foi capaz de aumentar os teores de pigmentos fotossintéticos nas plantas estressadas FM 970 (caracterizada como tolerante ao déficit hídrico) em comparação ao controle (aspersas apenas com água) (Figura 16). O aumento nos teores de pigmentos foi refletido diretamente na maior eficiência fotossintética, evidenciada pelas maiores taxas de A , E , g_s e A/C_i (Figura 13).

O melhor desempenho fotossintético da cultivar FM 970 sob estresse, pulverizada com sinalizadores, parece não ter sido resultado de melhorias na eficiência fotoquímica, pois os parâmetros de fluorescência da clorofila a das plantas tratadas com AS, MT e PH permaneceram praticamente iguais ao de plantas

estressadas e pulverizadas com água (Figura 14). Além disso, apesar do aumento nas taxas de assimilação de CO₂, não foi registrado incremento correspondente no acúmulo de biomassa, sugerindo uma realocação dos recursos obtidos durante a fotossíntese para funções relacionadas ao ajuste fisiológico para lidar com o estresse. Muito provavelmente, as plantas estressadas FM 970 tratadas com sinalizadores ativaram respostas mediadas pelo ácido abscísico (ABA) associadas com o ajuste osmótico (Figura 12 C) e controle estomático (Figura 13 B), para antecipar o ciclo e promover a floração em resposta ao estresse (DU et al., 2018).

Por outro lado, a cultivar FM 974 mostrou pouca ou nenhuma influência dos tratamentos de sinalização nos teores de pigmentos fotossintéticos, eficiência fotoquímica e trocas gasosas sob déficit hídrico (Figuras 13, 14, 15). Já a cultivar FM 911 tratada com AS mostrou maiores taxas de A , g_s e E sob restrição hídrica (Figura 13a, b, c), que foi associada diretamente com os maiores índices de tolerância ao estresse (Figura 11e), sem haver, contudo, relação com a eficiência fotoquímica (Figura 14) e acúmulo de pigmentos fotossintéticos (Figura 15). Os dados sugerem que o processo de sinalização tem impacto limitado as cultivares com menor tolerância ao déficit hídrico, e que a eficiência fotossintética é mais influenciada por fatores estomáticos que não estomáticos (SHARMA et al., 2019).

Os achados obtidos sugerem que plantas de algodão apresentam elevada rusticidade quanto a eficiência fotoquímica sob condições de déficit hídrico. Em todas as cultivares estudadas, os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* foram mantidos praticamente inalterados entre plantas bem irrigadas e sob déficit hídrico (Figura 14). De forma surpreendente, plantas estressadas mostraram menores valores de quenching de dissipação não fotoquímica em comparação a plantas bem irrigadas, algo bastante incomum sob condições de estresse (Figura 14 D). Tais dados sugerem mecanismos ainda não explorados para a cultura, possivelmente rotas de dissipação fotoquímica para o aumento da eficiência da captação de luz e ativação de mecanismos de fotoproteção (HAMANI et al., 2020; MUHAMMAD et al., 2021).

Os resultados sugerem ainda que a modulação dos teores de lignina pode constituir importante rota de defesa contra o déficit hídrico (Figura 16). O acúmulo de lignina nas raízes das plantas sensíveis (FM 911) estressadas, sob sinalização com MT e PH, pode ter sido determinante para reforçar as células do xilema (LIU et al., 2022). Como consequência, a rigidez dos tecidos de transporte favoreceu a

manutenção da sua forma frente a reduções de potencial hídrico impulsionadas pelo déficit hídrico, para evitar o colapso interno dos vasos do xilema (CHOI et al., 2023). Dessa forma o aumento da lignina, mediado por sinalizadores na cultivar sensível, possivelmente constituiu uma importante estratégia de aclimação contribuindo para o melhor desempenho das plantas sob ambiente estressante.

5.4.3 O desempenho superior mediado por sinalizadores na cultivar de algodão sensível ao estresse é associado com maior o potencial antioxidante

Inúmeros relatos reportam que o déficit hídrico causa desequilíbrios no transporte de elétrons da cadeia de transporte de elétrons (CTE) de cloroplastos e mitocôndrias, o que leva a acumulação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (BÖHMER et al., 2023; WANG et al., 2023). Assim, para evitar danos a estrutura celular, a ação de sistemas antioxidantes de defesa se torna fundamental sob estresse (BINODH et al., 2023; ZAFAR et al., 2023). No presente estudo, plantas de algodão apresentaram aumentos significativos na atividade da enzima G-POD, em ambas as cultivares submetidas a restrição hídrica, sugerindo ser uma enzima responsiva aos danos causados pelo estresse oxidativo. A ação da G-POD foi intensificada nas plantas FM 911 tratadas com os sinalizadores (Figura 17b), o que foi associado com reduções na peroxidação lipídica (redução nos teores de MDA) (Figura 17c).

A cultivar FM 970 apresentou incrementos massivos na atividade da G-POD quando expostas ao déficit hídrico, porém, este efeito foi revertido quando as plantas estressadas foram tratadas com AS, MT e HP (Figura 17b). Tais resultados podem ser explicados pelo fato de as plantas estressadas terem apresentado leves conteúdos de H_2O_2 , como evidenciado pelos teores de H_2O_2 (Figura 17d), o que não resultou em danos aos lipídeos de membrana (Figura 17c), e possivelmente não resultou em estresse oxidativo severo. Assim, os incrementos nos danos de membrana de plantas estressadas FM 970, em função da aplicação de MT e HP, provavelmente foram decorrentes do resultado das vias de sinalização para ativação das rotas de defesa, mais que relacionado a danos ocasionados pelo estresse (Figura 18c) (SUPRIYA, 2022).

5.5 Conclusão

Os dados evidenciaram que o déficit hídrico impõe limitações severas na fisiologia, bioquímica e crescimento de plantas de algodão. As plantas apresentam respostas diferenciais aos tratamentos com sinalizadores, que variam de acordo com a interação entre o tipo de sinalizador e a cultivar estudada. O ácido salicílico exógeno alivia os danos do estresse sobre o crescimento da cultivar FM 911, uma cultivar sensível ao déficit hídrico. O desempenho superior das plantas FM 911 estressadas e tratadas com ácido salicílico é resultado da maior eficiência fotossintética e do maior potencial antioxidante.

Cultivares de algodão tolerantes ao déficit hídrico (FM 970) apresentaram respostas fisiológicas relevantes quando tratadas com ácido salicílico, melatonina e peróxido de hidrogênio. Tais respostas são associadas com a alta eficiência fotossintética, acúmulo de pigmentos, e redução do potencial osmótico; mas que não resultam em maior crescimento sob condições de estresse, pelo menos durante o período estudado.

Mais estudos são necessários para validar o potencial dos agentes sinalizadores no algodoeiro sob restrição hídrica, especialmente sob condições de campo e avaliando o potencial produtivo das cultivares frente aos tratamentos estudados.

5.6 Referências

ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001.

BAO, A. K.; WANG, Y. W.; XI, J. J.; LIU, C.; ZHANG, J. L.; WANG, S. M. Co-expression of xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* ZxNHX and ZxVP1-1 enhances salt and drought tolerance in transgenic *Lotus corniculatus* by increasing cations accumulation. **Functional Plant Biology**, v. 41, n. 2, p. 203-214, 2013.

BARBER, M. S.; RIDE, J. P. A quantitative assay for induced lignification in wounded wheat leaves and its use to survey potential elicitors of the response. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 32, n. 2, p. 185-197, 1988.

BARROS, T. C.; MELLO PRADO, R.; ROQUE, C. G.; ARF, M. V.; VILELA, R. G. Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 5, p. 458-465, 2019.

BINODH, A. K; KATHIRESAN, P.K; THANKAPPAN, S.; SENTHIL, A. Acclimatization of non-cultivated rice landraces to early moisture stress mediated by enzymatic antioxidants and osmolyte accumulation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 47, p. 102623, 2023.

BÖHMER, S.; MARX, C.; GOSS, R.; GILBERT, M.; SASSO, S.; HAPPE, T.; HEMSCHMEIER, A. *Chlamydomonas reinhardtii* mutants deficient for old yellow enzyme 3 exhibit increased photooxidative stress. **Plant Direct**, v. 7, n. 1, p. e480, 2023.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.

ČATSKÝ, J. Determination of water deficit in disks cut out from leaf blades. **Biologia plantarum**, v. 2, n. 1, p. 76-78, 1960.

CONAB a. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: décimo segundo levantamento, setembro 2023**, v. 10, safra 2022/2023. Brasília. 2023.

CONAB b. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: segundo levantamento, novembro 2023**, v. 11, safra 2023/2024. Brasília. 2023.

CHEESEMAN, J. M. Hydrogen peroxide concentrations in leaves under natural conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 10, p. 2435-2444, 2006.

CHOI, S. J.; LEE, Z.; KIM, S.; JEONG, E.; SHIM, J. S. Modulation of lignin biosynthesis for drought tolerance in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1116426, 2023.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004.

ROSA, V. R.; SANTOS, A. L. F.; SILVA, A. A., SAB, M. P. V., GERMINO, G. H., CARDOSO, F.B.; SILVA, M. A. Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascomyllum nodosum* (L.) seaweed extract. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 228-243, 2021.

SANTOS, A.; MATOS, E. S.; FREDDI, O. S.; GALBIERI, R.; LAL, R. Cotton production systems in the Brazilian Cerrado: the impact of soil attributes on field-scale yield. **European Journal of Agronomy**, v. 118, p. 126090, 2020.

SONG, W.; SHAO, H.; ZHENG, A.; ZHAO, L.; XU, Y. Advances in the roles of salicylic acid in plant tolerance responses to biotic and abiotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 19, p. 3475, 2023.

DU, H.; HUANG, F.; WU, N.; LI, X.; HU, H.; XIONG, L. Integrative regulation of drought escape through ABA-dependent and-independent pathways in rice. **Molecular Plant**, v. 11, n. 4, p. 584-597, 2018.

HAMANI, A. K. M.; WANG, G.; SOOTHAR, M. K.; SHEN, X.; GAO, Y.; QIU, R.; MEHMOOD, F. Responses of leaf gas exchange attributes, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in NaCl-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings to exogenous glycine betaine and salicylic acid. **BMC Plant Biology**, v. 20, n. 1, p. 1-14, 2020.

HATFIELD, R.; FUKUSHIMA, R. S. Can lignin be accurately measured? **Crop science**, v. 45, n. 3, p. 832-839, 2005.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189-198, 1968.

HU, W.; ZHANG, J.; WU, Z.; LOKA, D. A.; ZHAO, W.; CHEN, B.; GAO, L. Effects of single and combined exogenous application of abscisic acid and melatonin on cotton carbohydrate metabolism and yield under drought stress. **Industrial Crops and Products**, v. 176, p. 114302, 2022.

HU, W.; CAO, Y.; LOKA, D. A.; HARRIS-SHULTZ, K. R.; REITER, R. J.; ALI, S.; ZHOU, Z. Exogenous melatonin improves cotton (*Gossypium hirsutum* L.) pollen fertility under drought by regulating carbohydrate metabolism in male tissues. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 151, p. 579-588, 2020.

ISHIBASHI, Y.; YAMAGUCHI, H.; YUASA, T.; IWAYA-INOUE, M.; ARIMA, S.; ZHENG, S. H. Hydrogen peroxide spraying alleviates drought stress in soybean plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, n. 13, p. 1562-1567, 2011.

JIANG, D.; LU, B.; LIU, L.; DUAN, W.; CHEN, L.; LI, J.; ZHANG, K.; SUN, H.; ZHANG, Y.; DONG, H.; LI, C.; BAI, Z. Exogenous melatonin improves salt stress adaptation of cotton seedlings by regulating active oxygen metabolism. **PeerJ**, v. 8, p. e10486, 2020.

JIANG, D.; LU, B.; LIU, L.; DUAN, W.; MENG, Y.; LI, J.; LI, C. Exogenous melatonin improves the salt tolerance of cotton by removing active oxygen and protecting photosynthetic organs. **Plant Biology**, v. 21, p. 1-19, 2021.

JIRA-ANUNKUL, W.; PATTANAGUL, W. Effects of hydrogen peroxide application on agronomic traits of rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress. **Plant, Soil and Environment**, v. 67, n. 4, p.221-229, 2021.

KAR, M.; MISHRA, D. Catalase, peroxidase, and polyphenoloxidase activities during rice leaf senescence. **Plant Physiology**, v. 57, n. 2, p. 315-319, 1976.

KERCHEV, P.; VAN DER MEER, T.; SUJEETH, N.; VERLEE, A.; STEVENS, C. V.; VAN BREUSEGEM, F.; GECHEV, T. Molecular priming as an approach to induce tolerance against abiotic and oxidative stresses in crop plants. **Biotechnology Advances**, v. 40, p. 107503, 2020.

KOO, Y. M.; HEO, A. Y.; CHOI, H. W. Salicylic acid as a safe plant protector and growth regulator. **The Plant Pathology Journal**, v. 36, n. 1, p. 1, 2020.

KHATTAK, W. A.; HE, J.; SUN, J.; ALI, I.; BILAL, W.; ZAHOOR; ZHOU, Z. Foliar melatonin ameliorates drought-induced alterations in enzyme activities of sugar and nitrogen metabolisms in cotton leaves. **Physiologia Plantarum**, v. 175, n. 5, p. e14011, 2023.

LIU, C.; MA, D.; WANG, Z.; CHEN, N.; MA, X.; HE, X. Q. *MiR395c* regulates secondary xylem development through sulfate metabolism in poplar. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 897376, 2022.

M'RAH-HELALI, S.; NEBLI, H.; KADDOUR, R.; MAHMOUDI, H.; LACHAÂL, M.; OUEGH, Z. Influence of nitrate ammonium ratio on growth and nutrition of *Arabidopsis thaliana*. **Plant and Soil**, v. 336, p. 65-74, 2010.

MAHMOOD, T.; KHALID, S.; ABDULLAH, M.; AHMED, Z.; SHAH, M. K. N.; GHAFOR, A.; DU, X. Insights into drought stress signaling in plants and the molecular genetic basis of cotton drought tolerance. **Cells**, v. 9, n. 1, p. 105, 2019.

MANTOVANI, A. A method to improve leaf succulence quantification. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, 2011.

MIRANDA, R. S.; SOUZA, F. I. L.; ALVES, A. F.; SOUZA, R. R.; MESQUITA, R. O.; RIBEIRO, M. I. D.; GOMES-FILHO, E. Salt-acclimation physiological mechanisms at the vegetative stage of cowpea genotypes in soils from a semiarid region. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 4, p. 3530-3543, 2021.

MUHAMMAD, I.; SHALMANI, A.; ALI, M.; YANG, Q. H.; AHMAD, H.; LI, F. B. Mechanisms regulating the dynamics of photosynthesis under abiotic stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 615942, 2021.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

OMIDBAKHSHFARD, M. A.; SUJEETH, N.; GUPTA, S.; OMRANIAN, N.; GUINAN, K.; BROTMAN, Y.; NIKOLOSKE, Z.; FERNIE, A.; MUELLER-ROEBER, B.; GECHEV,

T. A biostimulant obtained from the seaweed *Ascophyllum nodosum* protects *Arabidopsis thaliana* from severe oxidative stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 2, p. 474, 2020.

OZTURK, M.; TURKYILMAZ UNAL, B.; GARCÍA-CAPARRÓS, P.; KHURSHEED, A.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 172, n. 2, p. 1321-1335, 2021.

QAMER, Z.; CHAUDHARY, M. T.; DU, X.; HINZE, L.; AZHAR, M. T. Review of oxidative stress and antioxidative defense mechanisms in *Gossypium hirsutum* L. in response to extreme abiotic conditions. **Journal of Cotton Research**, v. 4, n. 1, p. 1-9, 2021.

SHARMA, A.; SHAHZAD, B.; KUMAR, V.; KOHLI, S. K.; SIDHU, G. P. S.; BALI, A. S.; ZHENG, B. Phytohormones regulate accumulation of osmolytes under abiotic stress. **Biomolecules**, v. 9, n. 7, p. 285, 2019.

SILVA, A. C.; BRITO, F. M.; SANTOS, A. S.; BRITO, R. R.; LACERDA, J. J. J.; ALCANTARA NETO, F.; MIRANDA, R. S. Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) plants display contrasting sulfur-mediated drought acclimation in greenhouse and field. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 15, p. 3550-3569, 2023.

SILVA, A. A. R.; CAPITULINO, J. D.; LIMA, G. S.; AZEVEDO, C. A. V.; ARRUDA, T. F. L.; SOUZA, A. R.; SOARES, L. A. A. Peróxido de hidrogênio na atenuação dos efeitos do estresse salino nos indicadores fisiológicos e no crescimento da graviola. **Revista Brasileira de Biologia**, p. 84, 2022.

SILVA, R. L.; NASCIMENTO, M. N.; SILVA, A. L.; SANTOS, R. J. Chemical priming agents controlling drought stress in *Physalis angulata* plants. **Scientia Horticulturae**, v. 275, p. 109670, 2021.

SIMKIN, A. J.; KAPOOR, L.; DOSS, C. G. P.; HOFMANN, T. A.; LAWSON, T.; RAMAMOORTHY, S. The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. **Photosynthesis research**, v. 152, n. 1, p. 23-42, 2022.

SINGH, C. K.; RAJKUMAR, B. K.; KUMAR, V. Differential responses of antioxidants and osmolytes in upland cotton (*Gossypium hirsutum*) cultivars contrasting in drought tolerance. **Plant Stress**, v. 2, p. 100031, 2021.

SUPRIYA, L.; DURGESHWAR, P.; MUTHAMILARASAN, M.; PADMAJA, G. Melatonin mediated differential regulation of drought tolerance in sensitive and tolerant varieties of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 821353, 2022.

WANG, P.; LIU, W. C.; HAN, C.; WANG, S.; BAI, M. Y.; SONG, C. P. Reactive oxygen species: multidimensional regulators of plant adaptation to abiotic stress and development. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 1, p. 1-38, 2023.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v. 144, n. 3, p. 307-313, 1994.

XU, Z.; ZHOU, G.; SHIMIZU, H. Are plant growth and photosynthesis limited by pre-drought following rewatering in grass?. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 13, p. 3737-3749, 2009.

YANG, X.; LU, M.; WANG, Y.; WANG, Y.; LIU, Z.; CHEN, S. Response mechanism of plants to drought stress. **Horticulturae**, v. 7, n. 3, p. 50, 2021.

ZAFAR, M. M.; CHATTHA, W. S.; KHAN, A. I.; ZAFAR, S.; ANWAR, Z.; SELEIMAN, M. F.; RAZZAQ, A. Drought and heat stress on cotton genotypes suggested agro-physiological and biochemical features for climate resilience. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1265700, 2023.

ZAFAR, S.; AFZAL, H.; IJAZ, A.; MAHMOOD, A.; AYUB, A.; NAYAB, A.; MOOSA, A. Cotton and drought stress: An updated overview for improving stress tolerance. **South African Journal of Botany**, v. 161, p. 258-268, 2023.

ZAHID, Z.; KHAN, M. K. R.; HAMEED, A.; AKHTAR, M.; DITTA, A.; HASSAN, H. M.; FARID, G. Dissection of drought tolerance in upland cotton through morpho-physiological and biochemical traits at seedling stage. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 627107, 2021.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados de crescimento, fisiológicos e bioquímicos, foi possível concluir que as seis cultivares testadas apresentam respostas diferenciais às condições de limitação hídrica, podendo ser classificadas como contrastantes ao estresse. A cultivar FM 970 foi classificada como tolerante por apresentar melhores respostas de crescimento, alta eficiência fotossintética e menores danos de membrana. A cultivar FM 911 foi identificada como sensível ao déficit hídrico, pois apresentou menor crescimento, eficiência fotossintética reduzida e menor ajuste osmótico sobre condições de limitação hídrica.

Os níveis hídricos testados permitiram definir uma estratégia de economia de água para o algodão herbáceo utilizando nível de água no solo inferior a 80% da capacidade de campo. A análise minuciosa dos dados permitiu constatar que a capacidade de campo a 90% constitui importante estratégia de cultivo para todas as cultivares testadas. Os níveis 60 e 40% constituem estresse moderado e severo, respectivamente, o que levou a constatar que 50% da capacidade de campo constitui uma condição de estresse para todas as cultivares de algodão estudadas.

Os dados evidenciaram respostas diferenciais aos tratamentos com os potenciais sinalizadores de tolerância. De forma surpreendente, a cultivar sensível (FM 911) foi a mais responsiva aos tratamentos com sinalizadores, mostrando maior eficiência fotossintética e potencial antioxidante quando tratada com ácido salicílico. As plantas tolerantes ao déficit hídrico (FM 970) apresentaram respostas fisiológicas relevantes quando tratadas com ácido salicílico, melatonina e peróxido de hidrogênio. Tais respostas estão associadas à alta eficiência fotossintética, acúmulo de pigmentos e redução do potencial osmótico, embora não resultem em maior crescimento sob condições de estresse.

Os dados fornecem informações científicas relevantes para os programas voltados para a produtividade agrícola em ambientes afetados por limitações hídricas, com destaque para o uso do ácido salicílico, que foi capaz de aclimatar as plantas sensíveis. No entanto, estudos adicionais são necessários, principalmente em nível de campo, para compreender melhor o papel dos agentes testados na sinalização das rotas de defesa que levam à aclimação, e como isso afeta a produção das plantas de algodão.

Esses estudos fornecem informações valiosas sobre as melhores cultivares que podem ser cultivadas sob limitação hídrica, beneficiando diretamente os produtores de regiões semiáridas, especialmente na região produtiva do MATOPIBA, auxiliando na escolha das variedades mais adequadas. Além disso, nossos estudos podem ser utilizados em programas de prospecção e melhoramento genético, contribuindo diretamente para a expansão e desenvolvimento da cotonicultura.