



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM



ANDREZZA MAIA DE LIMA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**A ENZIMA SUPERÓXIDO DISMUTASE ATENUA O ESTRESSE HÍDRICO EM  
GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO?**

Campina Grande, PB

Maio de 2021

ANDREZZA MAIA DE LIMA

Agroecóloga

**A ENZIMA SUPERÓXIDO DISMUTASE ATENUA O ESTRESSE HÍDRICO EM  
GENÓTIPOS DE ALGODOEIRO?**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

**Orientadores:** Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes

Dra. Roseane Cavalcanti dos Santos

Campina Grande, PB

Maio de 2021

L732a

Lima, Andrezza Maia de.

A enzima superóxido dismutase atenua o estresse hídrico em genótipos de algodoeiro? / Andrezza Maia de Lima. – Campina Grande, 2021.

62 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.

"Orientação: Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes".

Referências.

1. Algodão (*Gossypium hirsutum* L.) – Cultura. 2. Estresse Hídrico. 3. Inovação Tecnológica. 4. Estresse Oxidativo. 5. Superóxido Dismutase (SOD). 6. Irrigação e Drenagem. I. Fernandes, Pedro Dantas. II. Título.

CDU 631.67:633.51(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA SEVERINA SUELI DA SILVA OLIVEIRA CRB-15725



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA  
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

### FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

**ANDREZZA MAIA DE LIMA**

A ENZIMA SUPERÓXIDO DISMUTASE ATENUA  
O ESTRESSE HÍDRICO EM GENÓTIPOS DE  
ALGODOEIRO?

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
como pré-requisito para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 28/05/2021

Pedro Dantas Fernandes – Orientador – PPGEA/CTRN/UFMG  
Vera Lucia Antunes de Lima – Examinadora Interna - UAEE/CTRN/UFMG  
Rennan Fernandes Pereira - Examinador Externo - Embrapa Algodão  
Élida Barbosa Corrêa - Examinadora Externa - CCAA/UEPB



Documento assinado eletronicamente por **PEDRO DANTAS FERNANDES, Usuário Externo**, em 14/06/2021, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rennan Fernandes Pereira, Usuário Externo**, em 14/06/2021, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elida Barbosa Corrêa, Usuário Externo**, em 15/06/2021, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/06/2021, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com

16/06/2021

SEI/UFG - 1539064 - PRPG-Folha de Assinatura para Teses e Dissertações



fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1539064** e o código CRC **AAD293D7**.

Referência: Processo nº 23096.025109/2021-76

SEI nº 1539064

## **DEDICATÓRIA**

*Ao meu pai, Francisco de Assis de Lima Araújo, que partiu para o plano espiritual durante a realização deste trabalho e não pôde, em vida, me ver Mestre. Ele tinha muito orgulho da minha dedicação aos estudos e por isso eu tenho no meu coração a certeza de sua felicidade neste momento.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

É com muita gratidão no coração que agora escrevo esta etapa do trabalho, neste momento passa em minha mente quantas pessoas me ajudaram, com companheirismo e paciência para que eu conseguisse chegar ao final deste objetivo de vida. Primeiramente Deus, que em sua infinita bondade permitiu que eu tivesse saúde física e mental suficiente, vários amigos pelo caminho, orientador maravilhoso, uma família para me confortar e diversas outras bênçãos que me trouxeram até aqui.

Aos meus pais, Francisco de Assis de Lima Araújo (*in memoriam*) e Disanete Maia de Lima, aos meus irmãos, meu filho André, minha avó, meus tios e tias que são a base de tudo que sou, obrigada pelo apoio nos momentos difíceis, pela confiança e amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e me ajudando a alcançá-los.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Pedro Dantas Fernandes e Dra. Roseane Cavalcanti dos Santos por terem confiado em mim e aceitado me orientar nessa tarefa tão desafiadora. Pela paciência, tempo cedido e apoio necessário para a realização deste trabalho. Trabalhar com eles foi a realização de um sonho que eu tinha desde o início da graduação.

Aos Professores do Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola: Hugo Orlando, Vera Lúcia, José Dantas, Carlos Azevedo, por todos os ensinamentos e amizade.

Meus agradecimentos, com muito amor a Aline Dayanne, Daniele, Rômulo Carantino, Mirandy Dias e Francisco de Assis pela grande ajuda e paciência na execução deste projeto, assim como pela amizade construída ao longo da pós-graduação.

À banca examinadora, professora Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima, Dr. Rennan Fernandes Pereira e Dra. Élide Barbosa Corrêa pela disponibilidade em contribuir para melhoria deste trabalho. Será uma honra e orgulho receber a colaboração de profissionais extremamente competentes em suas atribuições.

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade na realização do Mestrado.

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

À EMBRAPA – ALGODÃO, pelo acolhimento e apoio durante o período de formação e realização da pesquisa.

...meus sinceros agradecimentos.

*“É melhor adquirir sabedoria do que ouro”*

Provérbios 16:16

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS .....	xi
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS .....	18
2.1. Geral .....	18
2.2. Específicos .....	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1. Aspectos gerais do algodoeiro .....	19
3.2. Importância econômica do algodoeiro.....	20
3.3. Estresse hídrico no algodoeiro .....	20
3.4. Alterações fisiológicas e bioquímicas de plantas expostas ao estresse hídrico .....	21
3.5. Metabolismo oxidativo e enzimas antioxidantes.....	22
3.6. Superóxido dismutase e os processos fisiológicos e bioquímicos .....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	24
4.1. Localização do experimento .....	24
4.2. Fatores em estudo, tratamentos e delineamento estatístico.....	24
4.3. Instalação e condução do experimento .....	25
4.4. Preparação da solução de SOD e aplicação dos tratamentos .....	26
4.5. Variáveis e parâmetros analisados .....	28
4.5.1. Variáveis de crescimento.....	28
4.5.2. Parâmetros fisiológicos.....	28
4.5.3. Acúmulo de massa .....	29
4.6. Análise estatística .....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
5.1. Crescimento.....	30
5.2. Fisiologia aos 27 DAS .....	36
5.2.1. Trocas gasosas de plantas de algodoeiros .....	36
5.2.2. Fluorescência .....	42
5.2.2.1. Variáveis fotoquímicas .....	42
5.3. Acúmulo de massa em plantas de algodoeiro .....	48
6 CONCLUSÕES .....	53
7 RECOMENDAÇÕES .....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Características agronômicas das cultivares de algodão utilizadas neste estudo.....	23
<b>Tabela 2</b>	Análise química do composto orgânico, determinadas no laboratório Central Analítica, Maceió, AL, 2020.....	23
<b>Tabela 3</b>	Quantidade de SOD e de solução tampão utilizadas para preparar cada uma das concentrações de SOD.....	24
<b>Tabela 4</b>	Resumo da análise de variância para número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC) e altura de planta (AP), dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e suplementação exógena de superóxido dismutase, aos 27 DAS. Campina Grande, 2021.....	28
<b>Tabela 5</b>	Resumo da análise de variância para condutância estomática (gs), transpiração (E), fotossíntese (A), concentração interna de carbono (Ci) e eficiência intrínseca do uso da água (EiUA), dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e suplementação exógena de superóxido dismutase, aos 27 DAS. Campina Grande, 2021.....	34
<b>Tabela 6</b>	Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (Fo), máxima (Fm), variável (Fv), eficiência quântica (Fv/Fm) dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e suplementação exógena de superóxido dismutase, aos 27 DAS. Campina Grande, 2021.....	40
<b>Tabela 7</b>	Resumo da análise de variância para massa seca de raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e relação raiz parte aérea (R/PA) dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e aplicação de superóxido dismutase, aos 27 DAS.....	47

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	(A) Visão do local em que foi realizado o experimento. (B) Visão geral do experimento com plantas dos genótipos de algodão, submetidos a estresse hídrico, Campina Grande, PB, 2019.....	22
<b>Figura 2</b>	Aplicação foliar da SOD em plantas de algodoeiro, cultivadas em casa de vegetação na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Campina Grande, PB, 2019.....	25
<b>Figura 3</b>	Fotos com procedimento de avaliações de fluorescência e trocas gasosas nas plantas de algodão, 27 DAS, sob estresse hídrico. Campina Grande, PB, 2019.....	26
<b>Figura 4</b>	(A) Número de folhas dos quatro genótipos de algodoeiro, sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. Em 4B: NF dos genótipos, na interação com as concentrações de SOD, aos 27 DAS. Na Figura 4A, letras minúsculas iguais em cada genótipo são indicativos de não haver diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica; letras maiúsculas iguais entre genótipos indicam não haver diferenças entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey, $p < 0,05$ ).....	29
<b>Figura 5</b>	Diâmetro de caule de genótipos de algodoeiro (G) cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica (DH) e aplicação foliar de SOD, em diferentes concentrações, aos 27 DAS.....	30
<b>Figura 6</b>	Altura de plantas de algodoeiros, correspondente às interações duplas G x DH (A), DH x S (B) e G x S (C) aos 27 DAS. Em 6A, letras minúsculas iguais não diferem entre si para DH no mesmo genótipo; letras maiúsculas diferentes distinguem efeitos significativos do mesmo fator de estresse (DH) entre genótipos, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).....	31
<b>Figura 7</b>	(A) Condutância estomática (gs) do algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (B) condutância estomática do algodoeiro sob aplicações foliar de SOD. (C) transpiração (E) dos quatros genótipos de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (D) transpiração de algodoeiros cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS. Na Figura 7A e 7C letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica e letras maiúsculas iguais entre genótipos indica não haver diferença entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey $p < 0,05$ ).....	35
<b>Figura 8</b>	(A) Concentração interna de carbono (Ci) dos quatros genótipos de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (B) Concentração interna de carbono (Ci) do algodoeiro sob aplicações foliar de SOD. (C) taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> dos quatros genótipos de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (D) taxa de assimilação de CO <sub>2</sub> de algodoeiros cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS. Na Figura 8A e 8C letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica e letras maiúsculas iguais entre genótipos indica não haver diferença entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey $p < 0,05$ ).....	37

<b>Figura 9</b>	(A) Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) de quatro genótipos de algodoeiros. (B) Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (C) Eficiência instantânea do uso da água (EiUA) de algodoeiro sob aplicação foliar de SOD, ao 27 DAS. Na figura 9A letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre os genótipos. Na Figura 9B letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre disponibilidade hídrica (Deficiência hídrica e irrigação plena) (Tukey $p < 0,05$ ).....	39
<b>Figura 10</b>	(A) Fluorescência inicial (Fo) do algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena na interação com as concentrações de SOD. (B) Fluorescência inicial (Fo) de quatro genótipos de algodoeiro. (C) Fluorescência máxima (Fm) do algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena na interação com as concentrações de SOD. (D) Fluorescência máxima (Fm) dos genótipos na interação com estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena, aos 27 DAS. Na Figura 10B letras maiúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre genótipos. Na Figura 10D letras minúsculas iguais em cada genótipo são indicativos de não haver diferença significativa entre os tratamentos de disponibilidade hídrica; letras maiúsculas iguais entre genótipos indicam não haver diferença entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey $p < 0,05$ ).....	42
<b>Figura 11</b>	Fluorescência variável (Fv) de plantas de algodoeiro correspondente as interações duplas G x DH (A), DH x S (B) e G x S (C), aos 27 DAS. Em 11A letras minúsculas iguais não diferem entre si para disponibilidade hídrica no mesmo genótipo; letras maiúsculas diferente distingue efeito significativo do mesmo fator de estresse (DH) este genótipos (Tukey $p < 0,05$ ).....	44
<b>Figura 12</b>	Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) de plantas de algodoeiro correspondente as interações duplas G x DH (A), DH x S (B) e G x S (C), aos 27 DAS. Em 11A letras minúsculas iguais não diferem entre si para disponibilidade hídrica no mesmo genótipo; letras maiúsculas diferente distingue efeito significativo do mesmo fator de estresse (DH) este genótipos (Tukey $p < 0,05$ ).....	46
<b>Figura 13</b>	Massa seca da parte aérea (MSPA) de genótipos de algodoeiro (G) cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica (DH) e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS.....	48
<b>Figura 14</b>	Massa seca de raiz (MSR) de plantas de algodoeiros correspondente a interação dupla DH x S (A) e G x S (B), aos 27 DAS.....	49
<b>Figura 15</b>	Relação massa seca de raiz/ massa seca parte área (R/PA) de genótipos de algodoeiro (G) cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica (DH) e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS.....	50

## RESUMO

O algodão é uma das principais culturas exploradas comercialmente na região semiárida brasileira, onde as chuvas são irregulares em quantidade, distribuição espacial e temporal. Em tais condições, o estresse hídrico pode ser evitado ou minimizado pelos sistemas de defesa enzimático e não enzimático das plantas. Com base na importância da Superóxido Dismutase (SOD), por sua atuação em processos enzimáticos diversos na planta, objetivou-se avaliar sua aplicação exógena, como atenuante dos efeitos deletérios do estresse hídrico sobre crescimento e fisiologia do algodoeiro na fase vegetativa. A pesquisa foi desenvolvida em casa de vegetação, na Embrapa Algodão, no município de Campina Grande, PB. O cultivo foi em recipientes plásticos com capacidade de 0,6 dm<sup>3</sup> de solo. Foram testados quatro genótipos de algodão (BRS Seridó, FM 966, FMT 705 e CNPA 7MH), duas disponibilidades hídricas (estresse e irrigação plena) e quatro concentrações de superóxido dismutase (0, 50, 100 e 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD), em esquema fatorial 4 x 2 x 4, distribuídos em blocos casualizados, com quatro repetições e uma planta por parcela, resultando em 32 tratamentos e 128 parcelas. Foram realizadas análises de crescimento, acúmulo de massa, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a*. Em algodoeiros sob deficiência hídrica, mas sem aplicação de SOD, ocorreu redução de diâmetro do caule, altura de planta, transpiração, taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e massa da parte aérea, mas aumentaram a massa seca de raiz e a relação raiz parte aérea. Com aplicação de SOD, diminuiu a relação R/PA. Em todos os genótipos de algodão estudados, a eficiência quântica do fotossistema II e a tolerância das plantas ao déficit hídrico aumentam com aplicação de 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de Superóxido Dismutase (SOD). A enzima também contribuiu para aumentar a massa seca da parte aérea em genótipos considerados menos tolerantes à seca, em proporção semelhante à dos genótipos tolerantes.

**Palavras-chave:** Estresse oxidativo. *Gossypium hirsutum* L. Inovação tecnológica. SOD

## DOES SUPEROXIDE DISMUTASE ENZYME ATTENUATE WATER STRESS IN COTTON GENOTYPES?

### ABSTRACT

Cotton is one of the main crops commercially exploited in the semi-arid region of Brazil, where rainfall is irregular in quantity, spatial and temporal distribution. Under such conditions, water stress can be avoided or minimized by the plants' enzymatic and non-enzymatic defense systems. Based on the importance of Superoxide Dismutase (SOD), due to its performance in various enzymatic processes in the plant, the objective was to evaluate its exogenous application, as a mitigation of the deleterious effects of water stress on growth and physiology of cotton in the vegetative phase. The research was carried out in a protected environment (greenhouse), at Embrapa Algodão, in the city of Campina Grande, PB, in plastic pot with a capacity of 0.6 dm<sup>3</sup> of soil. Four cotton genotypes (BRS Seridó, FM 966, FMT 705 and CNPA 7MH), two water availability (stress and full irrigation) and four concentrations of superoxide dismutase (0, 50, 100 and 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> of SOD) were tested, in a 4 x 2 x 4 factorial scheme, distributed in randomized blocks, with four replications and one plant per plot, resulting in 32 treatments, and 128 experimental units. Growth, mass accumulation, gas exchange and chlorophyll *a* fluorescence analyzes were performed. In cotton plants under water deficit, but without SOD application, there was a reduction in stem diameter, plant height, transpiration, CO<sub>2</sub> assimilation rate and shoot mass, but increased root dry mass and root to shoot ratio. With SOD application, the R/PA ratio decreased. In all studied cotton genotypes, the quantum efficiency of photosystem II and plant tolerance to water deficit increase with the application of 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> of Superoxide Dismutase (SOD). The enzyme also contributes to increase shoot dry mass in genotypes considered less tolerant to drought, in a similar proportion to tolerant genotypes.

**Keywords:** *Gossypium hirsutum* L. Oxidative stress. SOD. Technologic innovation

## 1 INTRODUÇÃO

O algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.), originário da América Central, é considerado a fibra vegetal de maior importância mundial. A espécie foi domesticada a cerca de 4000 anos e é cultivada atualmente em mais de 60 países (INTERNATIONAL COTTON ADVISORY COMMITTEE - ICAC, 2021). O seu cultivo se insere entre os principais do agronegócio brasileiro, gerando emprego e renda. Além de ser a mais importante fonte natural de fibras, garante ao país lugar privilegiado no cenário internacional, como um dos cinco maiores produtores mundiais, ao lado de China, Índia, Estados Unidos e Paquistão (ICAC, 2021).

De acordo com Companhia Nacional de Abastecimento (2021), no presente ano a semeadura do algodão está finalizada, e as lavouras seguem em desenvolvimento, com a maioria já em fase reprodutiva (floração e formação de maçãs). Foram cerca de 1.413,1 mil hectares destinados à cotonicultura nesse ciclo, com redução de 15,2% em relação ao período anterior, fruto da retração do mercado ocorrida durante a pandemia de Covid-19 em 2020. Ao todo, a estimativa de produção em 2021 é da ordem de 6.124,7 mil toneladas de algodão em caroço, ou 2.493,6 mil toneladas de algodão em pluma. Esses valores indicam redução de 16,9%, em comparação aos resultados na temporada passada, decorrente, principalmente, da diminuição de área plantada.

Na região Nordeste, segunda maior produtora do país, a área plantada foi de 398 mil hectares de algodão na safra 2019/2020, cerca de 28% da área plantada no país. No Estado da Paraíba, foram cultivados 700 hectares, com produtividade média de 351 kg ha<sup>-1</sup> e um volume final de 200 toneladas de algodão em pluma (CONAB, 2021). A produção de algodão no estado da Paraíba ainda é baixa, atribuída a diversos fatores, dentre eles, a baixa e irregular pluviosidade.

Na Região Centro-Oeste, considerada a maior região produtora do país, houve diminuição de 14,5% na área plantada em 2021, em comparação ao registrado no exercício anterior. Foram cultivados, aproximadamente, 1.054 mil hectares, distribuídos entre os três estados da região; a maior redução absoluta foi registrada em Mato Grosso, motivada, principalmente, pela substituição de áreas antes voltadas para cotonicultura, que, nesse ciclo, em virtude das condições de mercado, foram direcionadas à semeadura de milho, segunda safra, além do estreitamento da janela ideal de plantio em virtude do atraso no ciclo da soja (CONAB, 2021).

No cenário mundial de mudanças climáticas, a seca tem se tornado cada vez mais frequente em regiões áridas e semiáridas do planeta, com fortes impactos socioeconômicos (IPCC, 2013). Em tais regiões, a ocorrência de períodos secos, em consequência da baixa ou irregular pluviosidade, é o fator ambiental que mais limita o soergimento de cultivos agrícolas, o que ocorre, também, na cotonicultura.

A deficiência hídrica é um dos mais severos estresses ambientais, com efeitos evidentes no crescimento e na produtividade do vegetal. Além disso, provoca perda da homeostase hídrica e afeta os processos de absorção e manutenção do acúmulo de água nos tecidos. Tais efeitos repercutem sobre a expansão e divisão das células, afeta o funcionamento de enzimas, a nutrição mineral, a condutância estomática, a fotossíntese, a síntese de solutos compatíveis, desencadeia danos celulares e leva à desidratação e perda de turgor (D'SOUZA e DEVERAJ, 2010).

Além disso, a limitação das trocas gasosas, pelo fechamento estomático, resulta em desequilíbrio entre a fase fotoquímica e o metabolismo do carbono, devido à diminuição da difusão do CO<sub>2</sub> (CHAVES et al., 2009). Essa limitação causa um desequilíbrio entre a atividade fotoquímica no fotossistema II (PSII) e a necessidade de elétrons para a fotossíntese, o que leva as plantas a serem expostas ao excesso de energia, com redução da cadeia de elétrons (YI et al., 2016).

Como consequência, reduz-se a atividade da cadeia de transporte de elétrons nos cloroplastos e nas mitocôndrias, formando espécies reativas de oxigênio (ROS) que são tóxicas, como ânion superóxido (O<sub>2</sub>•<sup>-</sup>), peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), radical hidroxila (HO•) e oxigênio singlete (1O<sub>2</sub>), que irão prejudicar o metabolismo da planta (NOCTOR, et al., 2014; YI et al., 2016; FOYER, 2018; DENAXA et al., 2020).

Segundo Vison et al. (2018), após a percepção da redução na disponibilidade de água, as plantas tolerantes reagem rapidamente para proteger as células contra o estresse oxidativo. Nessas condições, os vegetais tentam manter o potencial hídrico por meio da acumulação de osmoprotetores e/ou solutos compatíveis no interior da célula, independente do volume resultante da perda de água, além da ativação de mecanismos para melhorar o funcionamento celular sob estresse hídrico (LISAR et al., 2012).

O algodoeiro necessita, para seu crescimento e desenvolvimento, com certa frequência, de uma quantidade de água adequada definida de acordo com o solo e clima, essa necessidade hídrica varia de 400 mm a 700 mm por ciclo. Na maioria dos estudos com algodoeiro, têm sido pesquisados os efeitos da deficiência de água no solo, com registro de serem afetados o crescimento, a produtividade e a qualidade das fibras de algodão (CORDÃO

et al., 2018; LIMA et al., 2018; MACÊDO et al., 2019). Sekmen et al. (2014), ao estudarem duas cultivares de algodão submetidas a dez dias de estresse hídrico, verificaram que a cultivar tolerante foi menos afetada pelo estresse hídrico, com menor decréscimo no crescimento em relação ao genótipo mais sensível. No entanto, há carência de estudos com aplicação exógena de substâncias orgânicas, com investigação sobre os efeitos no metabolismo das plantas sob condições de estresse hídrico.

A enzima superóxido dismutase, por exemplo, é encontrada e ativada em quase todos os compartimentos celulares, incluindo mitocôndrias, cloroplastos, microsomos, glioxissomos e citosol (GRATÃO et al., 2005; GILL e TUTEJA, 2010; BARBOSA et al., 2014). A SOD é a única enzima, nas plantas, capaz de eliminar o poder tóxico causado pelo radical superóxido, gerando  $H_2O_2$  que é, posteriormente, eliminado pela catalase (CAT) ou pela ascorbato peroxidase (APX) (GECHEV et al., 2006).

Neste trabalho, tem-se como hipótese que a aplicação exógena da enzima superóxido dismutase reforçará os mecanismos de defesa do algodoeiro, na proteção contra radicais livres que surgem em condições de estresse, em geral. Com maior disponibilidade de enzimas antioxidantes, a planta poderá ativar mecanismos fisiológicos, bioquímicos e moleculares para se adaptar melhor ao estresse hídrico, favorecendo, assim, uma maior produção.

Na literatura não são encontrados trabalhos com aplicação exógena da enzima superóxido dismutase em algodoeiro. Portanto, estudos sobre mecanismos fisiológicos e estratégias de mitigação dos efeitos do estresse hídrico no cultivo do algodoeiro são relevantes, por gerar conhecimento e, conseqüentemente, viabilizar a sua exploração de forma econômica. A aplicação exógena da enzima superóxido dismutase como atenuante do estresse hídrico pode ser um avanço na agricultura, especialmente em regiões semiáridas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Avaliar efeitos da aplicação exógena da Superóxido Dismutase (SOD), como atenuante dos efeitos do estresse hídrico sobre o crescimento e fisiologia de genótipos de algodoeiro, na fase vegetativa.

### **2.2. Específicos**

- Avaliar a tolerância de quatro genótipos de algodoeiro ao estresse hídrico.
- Identificar materiais genéticos de algodoeiro mais adequados para o cultivo em área do Semiárido brasileiro, com base em variáveis de crescimento e fisiológicas.
- Determinar se a aplicação da enzima Superóxido Dismutase, de forma exógena, aumenta a tolerância de plantas de algodoeiro ao estresse hídrico.
- Avaliar as trocas gasosas e a fluorescência quântica do fotossistema II do algodoeiro cultivado sob estresse hídrico e aplicação exógena de SOD.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Aspectos gerais do algodoeiro

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é uma espécie dicotiledônea de ciclo anual ou perene, porte herbáceo, arbustivo ou arbóreo, pertencente à família *Malvaceae* e gênero *Gossypium*, de origem tropical, entre o México e a América Central. O gênero inclui 49 espécies já conhecidas, mas esse número pode estar subestimado, devido à falta de informações, principalmente das espécies que ocorrem nos continentes Africano e Asiático (ECHER et al., 2014). Dentre essas espécies, quatro se destacam por suas características de importância econômica, sendo *G. hirsutum*, *G. barbadense*, *G. herbaceum* e *G. arboreum* as mais cultivadas no mundo (GADELHA et al., 2014).

A altura das plantas pode variar dependendo da espécie e das condições de cultivo. O *Gossypium hirsutum*, tipicamente de fibra branca, é a espécie mais explorada comercialmente, com altura entre 0,6 m e 1,5 m, enquanto a *G. barbadense*, caracterizada por suas fibras longas e brilhantes, pode atingir altura de até 2,7 m (BORÉM e FREIRE, 2014). O caule principal e os ramos vegetativos crescem retos e eretos, com predominância do meristema apical do ramo principal. Ao contrário, os ramos reprodutivos têm meristemas, um por ramo, que caracterizam o crescimento em “espiral” da parte basal para a parte apical das plantas. O crescimento inicial do ramo reprodutivo é paralisado ao se formar a primeira estrutura reprodutiva, sendo retomado, em seguida, ao surgir um novo meristema (meristema axilar) para a formação de uma nova estrutura floral, o que pode se repetir, em sequência (RITCHIE et al., 2007).

O algodão possui folhas simples, classificadas em três tipos distintos: as cotiledonares, com formato reniforme característico, são as primeiras a surgir com a emergência das plântulas, os prófilos, de pequeno tamanho, localizados na base da gema, próxima à axila da folha verdadeira e as folhas verdadeiras, incompletas, tri ou pentalobadas, as quais podem ser subdivididas em vegetativas, ou do ramo, e as frutíferas, que são localizadas no lado oposto de cada nó frutífero, junto à estrutura reprodutiva (BORÉM e FREIRE, 2014).

As flores são hermafroditas, com pétalas creme ou amareladas que, quando expostas à radiação solar, os seus fitocromos reagem e as pétalas se tornam violáceas (BORÉM e FREIRE, 2014). O fruto é denominado de maçã, com três a cinco lóculos e 11 sementes por lóculo, em média. Quando o fruto se abre, as fibras ficam expostas, sendo denominado de capulho; as fibras têm comprimento variável entre os genótipos, com presença de línter no tegumento das sementes (BORÉM e FREIRE, 2014; SEAGRI, 2019).

### **3.2. Importância econômica do algodoeiro**

O algodão é um produto de extrema importância socioeconômica para o país, pois, além de ser a principal fibra natural, utilizada como matéria-prima na indústria têxtil, gera uma cadeia que engloba desde a produção no campo até o beneficiamento e a utilização de seus subprodutos, com geração de emprego e renda (CONAB, 2021).

Todos os anos, uma média de 35 milhões de hectares é plantada em todo o planeta, envolvendo mais de 350 milhões de pessoas na cadeia produtiva e movimento, anual, de aproximadamente, US\$ 12 bilhões. Nesse contexto, o Brasil se destaca como um dos principais produtores, exportadores de fibra e um dos maiores consumidores de algodão em pluma, com lugar privilegiado no cenário internacional (ABRAPA, 2021).

Em mais um recorde mensal, o Brasil exportou 221,9 mil toneladas de pluma em março de 2021. Esse volume é 158% acima do exportado em março de 2020. No acumulado deste ano, o país exportou 731,3 mil toneladas, volume 18% superior ao escoado nos três primeiros meses do ano passado, que foi de 619,8 mil toneladas. A receita com as vendas ao exterior, em março, totalizou US\$ 370,7 milhões, 66% superior a março de 2020 (CONAB, 2021).

No Brasil, o varejo segue enfraquecido em março, diante das novas medidas de distanciamento social, o que deve afetar, negativamente, o ritmo industrial, que estava em compasso de recuperação (CONAB, 2021). Nesse contexto, as exportações são as principais opções. Há, também, o medo de uma terceira onda da covid-19 na Europa, que comprometeria o consumo global de fibra de algodão. Por outro lado, a tensão entre Estados Unidos e China na área comercial pode abrir um espaço para o aumento da demanda chinesa pela fibra brasileira. Hoje a China já é o destino de um terço das nossas exportações (CONAB, 2021).

### **3.3. Estresse hídrico no algodoeiro**

A necessidade hídrica do algodoeiro é quantidade de água requerida pela cultura durante o seu ciclo fenológico, de modo a não limitar o crescimento, o desenvolvimento e a produção dessa cultura, sob as condições climáticas locais. A necessidade de água da cultura do algodoeiro varia de 400 a 700 mm por ciclo, dependendo das condições climáticas e da duração do ciclo da cultivar. A demanda diária de água aumenta ligeiramente com o crescimento das plantas (EMBRAPA, 2016).

A falta de água é um dos tipos de estresse abiótico mais crítico e comum em lavouras conduzidas em ambientes semiáridos. Os efeitos são evidentes em qualquer fase fenológica da planta e podendo variar de acordo com a severidade e duração do estresse (FAROOQ et al., 2009).

O algodoeiro é uma fibrosa possuidora de mecanismo fisiológico complexo, geralmente tolerante à seca, pelo eficiente mecanismo de ajustamento osmótico (BELTRÃO, 2011). O autor acrescenta que apesar de ter baixa eficiência assimilatória, essa malvacea não se satura em condições ecofisiológicas, com o máximo da densidade do fluxo radiante, o que lhe confere potencial para produzir, aproximadamente, 18 t ha<sup>-1</sup> de algodão em caroço.

A produtividade das plantas, limitada pela água, depende da quantidade disponível desse recurso e da eficiência de seu uso pelo indivíduo. Uma planta capaz de obter mais água ou que tem maior eficiência no seu uso tolerará melhor a seca (TAIZ et al., 2017).

O estresse hídrico no algodoeiro pode reduzir o tamanho dos botões florais, devido à redução da fotossíntese. O dano ao tamanho futuro do capulho é minimizado nesse estágio porque a planta primeiramente reduzirá o crescimento vegetativo e a produção de posições frutíferas e abortará botões pós-florescimento para preservar os assimilados para os frutos remanescentes. O estresse hídrico no pré-florescimento pode reduzir a produtividade pela menor área foliar (interceptação da radiação) e o estresse hídrico severo limitará a produção das posições frutíferas. A falta de água será mais deletéria durante a produção de botões florais antes do florescimento, já que a planta precisa estabelecer um dossel e um número de botões suficientes para ter um potencial produtivo alto (YEATES, 2014).

### **3.4. Alterações fisiológicas e bioquímicas de plantas expostas ao estresse hídrico**

As plantas desenvolvem inúmeros mecanismos de adaptação às condições de deficiência hídrica do solo, sendo comum a ativação de processos fisiológicos e bioquímicos, os quais estão comumente interligados e têm papel efetivo na tolerância à seca. A ativação desses mecanismos está diretamente associada com a espécie, a fase fenológica e a intensidade do estresse ao qual a planta foi exposta (LISAR et al., 2012).

O estresse hídrico provoca nas plantas, lentidão no crescimento foliar, menor desenvolvimento da planta, menor taxa de transpiração da área foliar e conseqüente redução na absorção de luz, resultando na redução da fotossíntese e da produtividade (TAIZ et al., 2017).

Portanto, a compreensão do envolvimento das redes fisiológicas e bioquímicas no processo de tolerância à seca é relevante para o desenvolvimento de plantas que possam

manter razoáveis rendimentos em condições de estresse hídrico (NEMALI E STEPHENS, 2014). Segundo Nogueira et al., (2013), a utilização de descritores fisiológicos e/ou bioquímicos, responsivos ao estresse hídrico, pode beneficiar, substancialmente, as estratégias de melhoramento genético voltadas para o semiárido.

### **3.5. Metabolismo oxidativo e enzimas antioxidantes**

O processo de sinalização e defesa contra o estresse hídrico tem sido associado ao nível de EROs e à atividade de enzimas antioxidantes, o que indica ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta a partir da redução do potencial hídrico celular (GRATÃO et al., 2005; BARBOSA et al., 2014). Acrescenta-se que o equilíbrio da atividade dessas enzimas nas células é fundamental para a determinação do nível estacionário de espécies reativas de oxigênio (APEL e HIRT, 2004).

Em condições ótimas de cultivo há baixa geração de EROs nos compartimentos celulares vegetais (GILL e TUTEJA, 2010). Contudo, a exposição a fatores de estresse ambiental pode aumentar a produção de EROs (LISAR et al., 2012; BARBOSA et al., 2014).

As EROs exercem papéis divergentes nas plantas. Em baixas concentrações, atuam como moléculas sinalizadoras mediando vários processos celulares, incluindo alterações desencadeadas pela exposição a fatores de estresse ambiental, enquanto que, em altas concentrações, podem causar danos graves aos componentes celulares (LISAR et al., 2012; BARBOSA et al., 2014). Em altas concentrações, as EROs comumente causam danos em aminoácidos, lipídeos, proteínas e no DNA, o que leva a alterações intrínsecas nas propriedades das membranas e, em estágio mais avançado, à morte celular (GILL e TUTEJA, 2010). Desta forma, o equilíbrio entre a formação e a remoção de EROs é essencial para o bom funcionamento das células vegetais, especialmente quando expostas a condições de estresse hídrico (BARBOSA et al., 2014).

### **3.6. Superóxido dismutase e os processos fisiológicos e bioquímicos**

Na falta de informações, na literatura disponível, sobre o efeito da aplicação exógena de SOD em plantas, são comuns referências de efeitos endógenos de plantas sob estresse. Os trabalhos discutem os efeitos do estresse apenas sob os índices de SOD encontrados nas plantas.

A seleção de plantas para o ambiente semiárido deve considerar a habilidade de adaptação do genótipo à situação de déficit hídrico, pela possibilidade de produção em condições adversas de clima. Na célula, a baixa disponibilidade hídrica leva ao desequilíbrio

entre a formação e desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (EROs), desencadeando o estresse oxidativo que se reflete diretamente no fenótipo da planta. Os principais tipos de EROs são: oxigênio singleto ( $^1O_2$ ), superóxido ( $O_2^{\bullet-}$ ),  $H_2O_2$  e o radical hidroxila ( $OH^{\bullet}$ ) (SCANDALIOS, 2005; GILL e TUTEJA, 2010).

Para eliminar o excesso dessas espécies reativas, as plantas fazem uso de mecanismos enzimáticos e não enzimáticos de desintoxicação celular, cuja velocidade de resposta representa o diferencial entre a tolerância ou sensibilidade ao estresse imposto (GILL e TUTEJA, 2010; BARBOSA et al., 2014). No processo enzimático, a principal enzima envolvida é a superóxido dismutase (SOD), responsável pelo início do processo de neutralização de ROS, cujo papel é dismutar radicais  $O_2^{\bullet-}$  para  $H_2O_2$  e oxigênio ( $O_2$ ). Funções das outras enzimas: catalase (CAT), a responsável pela conversão do  $H_2O_2$  à água ( $H_2O$ ) e  $O_2$ ; e as peroxidases, como a ascorbato peroxidase (APX) e guaiacol peroxidase (GPX), que reduzem o  $H_2O_2$  à  $H_2O$  (APEL e HIRT, 2004).

A SOD pertence à família das metaloenzimas e é considerada a barreira antioxidante mais eficaz presente nos compartimentos subcelulares (GILL e TUTEJA, 2010). Em plantas superiores, três tipos são caracterizados e classificados de acordo com os cofatores metálicos, que são: cobre e zinco (Cu/Zn-SOD), manganês (Mn-SOD) e ferro (Fe-SOD) (BARBOSA et al., 2014). Quanto à localização, a Cu/Zn-SOD é a forma mais abundante em células vegetais, sendo detectada, principalmente, em cloroplastos, citosol e peroxissomos (PILON et al., 2011; HUSEYNOVA et al., 2014). A Mn-SOD está presente nas mitocôndrias e peroxissomos, enquanto a Fe-SOD é verificada nos cloroplastos (PILON et al., 2011).

## 4 MATERIAL E METÓDOS

### 4.1. Localização do experimento

O experimento foi conduzido em condições de ambiente protegido (casa de vegetação), na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Algodão, localizada na cidade de Campina Grande, PB, Brasil (7° 13' 50" S, 35° 52' 52" O, 551 m), no período de novembro a dezembro de 2019.



**Figura 1.** Visão do local em que foi realizado o experimento com plantas dos genótipos de algodão, submetidos a estresse hídrico, Campina Grande, PB, 2019.

### 4.2. Fatores em estudo, tratamentos e delineamento estatístico

Os tratamentos resultaram da combinação entre três fatores: quatro genótipos de algodão (BRS Seridó, FM 966, FMT 705 e CNPA 7MH), duas disponibilidades hídrica (estresse por deficiência, por supressão hídrica e irrigação plena) e quatro concentrações de superóxido dismutase (0, 50, 100 e 150  $\text{Ug}^{-1} \text{MF min}^{-1}$ ). Iniciou-se a supressão hídrica aos 21 DAS, com duração de seis dias. A SOD foi aplicada no terceiro, quarto e quinto dia e, no sexto dia, foi feita avaliação das trocas gasosas e coleta das plantas para avaliação da fitomassa. As plantas controle para a enzima foram aquelas que não receberam aplicação de SOD e as plantas controle para disponibilidade hídrica, foram as que não receberam água.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 4 x 2 x 4, com 4 repetições, perfazendo o total de 128 unidades experimentais. A definição das concentrações de SOD baseou-se na quantidade média de SOD, encontrada em análises bioquímicas de genótipos de algodoeiro, com base em dados da literatura (RODRIGUES, 2016; PAIXÃO, 2017; WU, 2015).

Os genótipos de algodão em estudo foram desenvolvidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA e pela Fundação Mato Grosso – FMT, cujas características agronômicas estão na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características agronômicas das cultivares de algodão utilizadas neste estudo

Genótipo	Tipo	AA	Características
BRS Seridó <sup>1</sup>	H	Semiárido	FB, TS, ARM
FM 966	H	Cerrado	FB, PA, ARM
FMT 705	H	Cerrado	FB, PA, ARM
CNPA 7MH <sup>1</sup>	H	Semiárido	FB, RS, ARM

<sup>1</sup>Derivado de cruzamento entre mocó e herbáceo. H - Herbáceo; AA - adaptação ambiental; FB - Fibra Branca, PA - Produtividade Alta, ARM - Alto Rendimento de Maças Maduras, TS - Tolerante à Seca, RS - Resistente à Seca

### 4.3. Instalação e condução do experimento

Inicialmente, foi realizada uma triagem das sementes com o objetivo de eliminar aquelas que continham danos físicos e/ou má formação. Os recipientes foram preenchidos com a mistura, em partes iguais, de dois tipos de substratos<sup>1</sup>, cujos dados da análise química<sup>2</sup>, antes da semeadura, estão na Tabela 2. As plantas de algodoeiro foram cultivadas em recipientes plásticos (vasos) com volume de 0,6 L (Figura 1), com perfurações na base para permitir a drenagem do excesso de água.

<sup>1</sup> Substratos utilizados: Basaplant e Berra boi.

<sup>2</sup> Laboratório Central Analítica, Maceió, AL.

**Tabela 2.** Resultados da análise química do substrato, realizada no laboratório Central Analítica, Maceió, AL, 2020.

Parâmetros	Resultados
Nitrogênio Total (%)	1,29
Fósforo - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,86
Potássio - K <sub>2</sub> O (%)	0,62
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	114,5
Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )	8.260
Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )	213,6
Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	167,4
Cálcio (mg kg <sup>-1</sup> )	7.758
Magnésio (mg kg <sup>-1</sup> )	3.208

Preenchidos os recipientes e antes da semeadura, a umidade do substrato foi elevada ao nível correspondente ao da capacidade de campo. Na semeadura, foram distribuídas três sementes por recipiente na profundidade de 1,5 cm abaixo do nível do solo. Aos 9 dias após a semeadura (DAS), foi realizado desbaste, deixando-se apenas uma planta por recipiente, a mais vigorosa.

A adubação ocorreu aos 13 DAS através da aplicação de 25% da solução nutritiva proposta por Furlani et al. (1999), com adaptação para o cultivo inicial das plantas. Para o preparo de 10 litros de solução nutritiva foi utilizado 1,9 g de nitrato de cálcio, 1,25 g de nitrato de potássio, 0,38 g de fosfato monoamônio (MAP) e 1 g de sulfato de magnésio. Após a diluição, foram aplicados 50 mL em cada lisímetro.

No decorrer do experimento, os recipientes foram mantidos livres de plantas espontâneas, manualmente. Foi realizado monitoramento de pragas e doenças, mas sem necessidade de intervenção com defensivos agrícolas. As irrigações foram diárias, sempre ao final da tarde, elevando a umidade do substrato no nível correspondente ao da capacidade campo, nas plantas que não estavam passando pelo período de estresse.

#### **4.4. Preparação da solução de SOD e aplicação dos tratamentos**

A SOD (Cu/Zn-SOD) foi adquirida da Merck/Sigma Aldrich (Alemanha), em formato de pó liofilizado, em embalagem de 20,3 gramas. O peso molecular da SOD, nessa embalagem, era de 4.506 Unidades mg<sup>-1</sup> de proteína. Para obtenção das quatro concentrações

foi previamente preparada uma solução tampão fosfato, com pH 7,4, para diluir a SOD e as soluções foram obtidas, conforme a Tabela 2, minutos antes de sua aplicação nas plantas.

**Tabela 3.** Quantidade de SOD e de solução tampão utilizadas para preparar cada uma das concentrações de SOD

Concentração	Quantidade de SOD ( $\mu\text{L}$ )	Quantidade de solução tampão (FÓRMULA) (mL)
C1	-	7
C2	3,8	7
C3	7,6	7
C4	11,4	7

C1- 0, C2- 50, C3-100 e C4 150  $\text{Ug}^{-1}\text{MF min}^{-1}$  de SOD

Transcorridos 21 DAS, foi iniciada a supressão hídrica durante seis dias, com aplicação de SOD nas plantas, via foliar, a partir do terceiro dia de suspensão da irrigação, repetida até o quinto dia conforme os tratamentos pré-estabelecidos. A SOD foi aplicada apenas na segunda folha completamente expandida, do ápice para a base. As aplicações foram feitas com a utilização de um pincel de cerdas finas nas faces abaxial e adaxial das folhas do algodoeiro, até o ponto de molhamento das folhas (Figura 2), realizadas sempre ao final da tarde.



**Figura 2.** Aplicação foliar da SOD em plantas de algodoeiro, cultivadas em casa de vegetação na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Campina Grande, PB, 2019.

## 4.5. Variáveis e parâmetros analisados

### 4.5.1. Variáveis de crescimento

Aos 27 dias após a semeadura, realizaram-se as mensurações de número de folhas, altura de planta e diâmetro de caule. Foram contabilizadas apenas as folhas com comprimento superior a 2,5 cm. Na altura de planta foi considerado o comprimento (cm) da parte aérea, do nível do solo (colo da planta) até a gema apical do ramo principal.

### 4.5.2. Parâmetros fisiológicos

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas aos 27 DAS (final do estresse hídrico), no horário compreendido entre 8 h 30 min e 10 h 00, na terceira folha completamente expandida, do ápice para a base. Parâmetros de trocas gasosas avaliados: condutância estomática ( $g_s$ ) ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), transpiração ( $E$ ) ( $\text{mmol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ). Foi utilizado um equipamento portátil de trocas gasosas (Infra Red Gas Analyser –IRGA, marca ADC BioScientific Ltd, modelo LC-Pro), em condições naturais de temperatura do ar, concentração de  $\text{CO}_2$  e com uma fonte artificial de radiação de  $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figura 3B).

Com base nesses dados, foi estimada a eficiência instantânea do uso da água ( $E_iUA$ ) ( $A/E$ ) ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) / ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (KONRAD et al., 2005; MAGALHÃES FILHO et al., 2008).

As mesmas folhas foram utilizadas para as medições da fluorescência da clorofila  $a$ , com uso de fluorômetro de pulso modulado, modelo OS5p da Opti Science (Figura 3A), sendo utilizado o protocolo eficiência quântica ( $F_v/F_m$ ). Foram mensuradas as variáveis de indução de fluorescência: Fluorescência inicial ( $F_o$ ), Fluorescência máxima ( $F_m$ ), Fluorescência variável ( $F_v = F_m - F_o$ ) e máxima eficiência quântica do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ). As avaliações foram em folhas (procedimento já descrito), com adaptação de parte do limbo ao escuro por um período de 30 minutos, com uso de um clipe do equipamento, de modo a garantir que todos os aceptores primários estivessem totalmente oxidados (KONRAD et al., 2005).



**Figura 3.** Fotos com procedimento de avaliações de fluorescência e trocas gasosas nas plantas de algodão, 27 DAS, sob estresse hídrico. Campina Grande, PB, 2019.

#### **4.5.3. Acúmulo de massa**

Aos 28 DAS, as plantas foram coletadas, separadas em parte aérea e raiz, armazenadas em sacos de papel, identificadas e levadas para secar em estufa com circulação forçada de ar, a 65 °C constantes por 72 horas. Ao final, obteve-se, por meio de pesagem em balança analítica ( $\epsilon = 0,01$  g), a massa seca da parte aérea (MSPA, em g), raiz (MSR, g) e a relação raiz/ parte aérea (MSR/MSPA).

#### **4.6. Análise estatística**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ), após os testes de homogeneidade (normalidade de sua distribuição). As médias dos fatores qualitativos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $\alpha \leq 0,05$ ) e os modelos de regressão, para o fator quantitativo, foram ajustados de acordo com o coeficiente de determinação até 5% de significância através do Software Sisvar (FERREIRA, 2019).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Crescimento

De acordo com o resumo da análise de variância (Tabela 4), houve efeito significativo dos genótipos sobre o número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC) e altura de planta (AP), aos 27 DAS. Para disponibilidade hídrica, efeito significativo foi registrado para NF, DC e AP, enquanto que para aplicação de SOD, o efeito significativo foi apenas para DC e AP. Considerando ser mais importante discutir os efeitos das interações, quando significativas, destaques são dados à interação G x DH sobre NF e AP, interação G x S sobre as variáveis NF, DC e AP e interação DH x S para DC e AP. Foi observado efeito da interação tripla entre os fatores, apenas para DC.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância para número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC) e altura de planta (AP), dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e suplementação exógena de superóxido dismutase, aos 27 DAS. Campina Grande, PB, 2021.

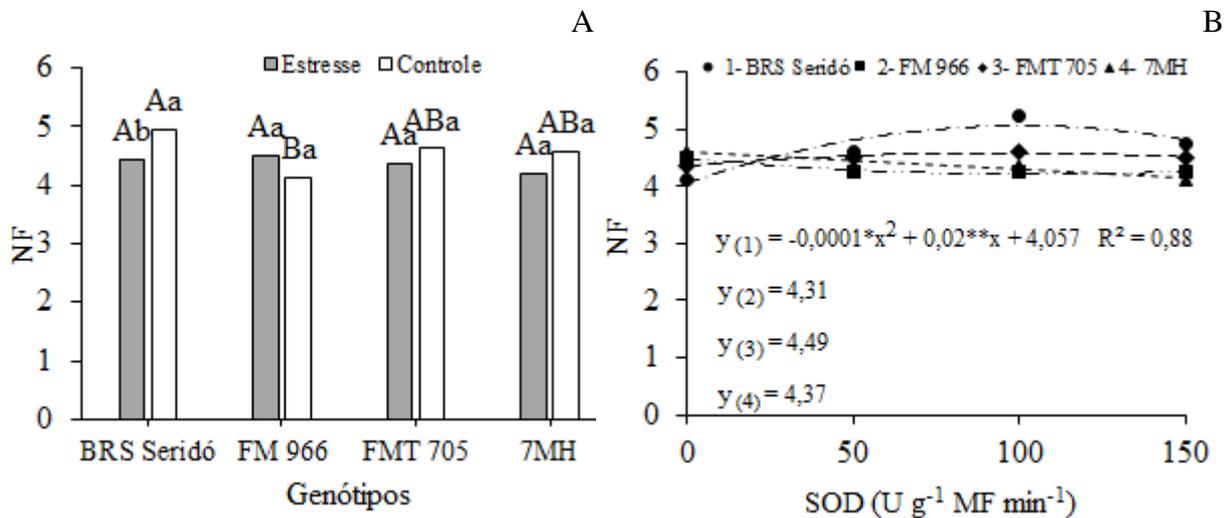
Fontes de variação	GL	Quadrados médios		
		NF	DC	AP
Genótipo (G)	3	0,87*	1,28**	174,84**
D. Hídrica (DH)	1	1,12*	2,72**	209,40**
SOD (S)	3	0,35 <sup>ns</sup>	0,12*	13,92**
Interação (G x DH)	3	1,20*	0,04 <sup>ns</sup>	24,55**
Interação (G x S)	9	0,63*	0,07*	8,64**
Interação (DH X S)	3	0,43 <sup>ns</sup>	0,16**	69,30**
Interação (G x DH x S)	9	0,43 <sup>ns</sup>	0,11**	5,46 <sup>ns</sup>
Bloco	3	19,35**	0,10*	2,95 <sup>ns</sup>
Resíduo	95	0,305	0,03	3,52
CV (%)	-	12,37	2,86	7,33

CV- Coeficiente de variação; GL- Graus de liberdade; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup> - não significativo a 5% de probabilidade.

Em NF, constatou-se efeito significativo das interações G x DH e G x S. O número de folhas do algodoeiro ‘BRS Seridó’ teve redução de 4,9% quando submetido ao estresse hídrico. Nos demais genótipos não houve diferença significativa entre o tratamento controle (plantas em irrigação plena) e o tratamento com estresse hídrico (Figura 4A).

Em relação à superóxido dismutase (Figura 4B), pelos dados da interação G x S, o maior número de folhas (5,06) foi encontrado na ‘BRS Seridó’, com ajuste dos dados ao modelo quadrático, houve aumento de 24,6% na emissão de folhas quando foram aplicados

100 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD, em comparação ao tratamento sem a SOD. Para os genótipos FM 966, FMT 705 e CNPA 7MH, não foi observada diferença significativa entre as concentrações de SOD.



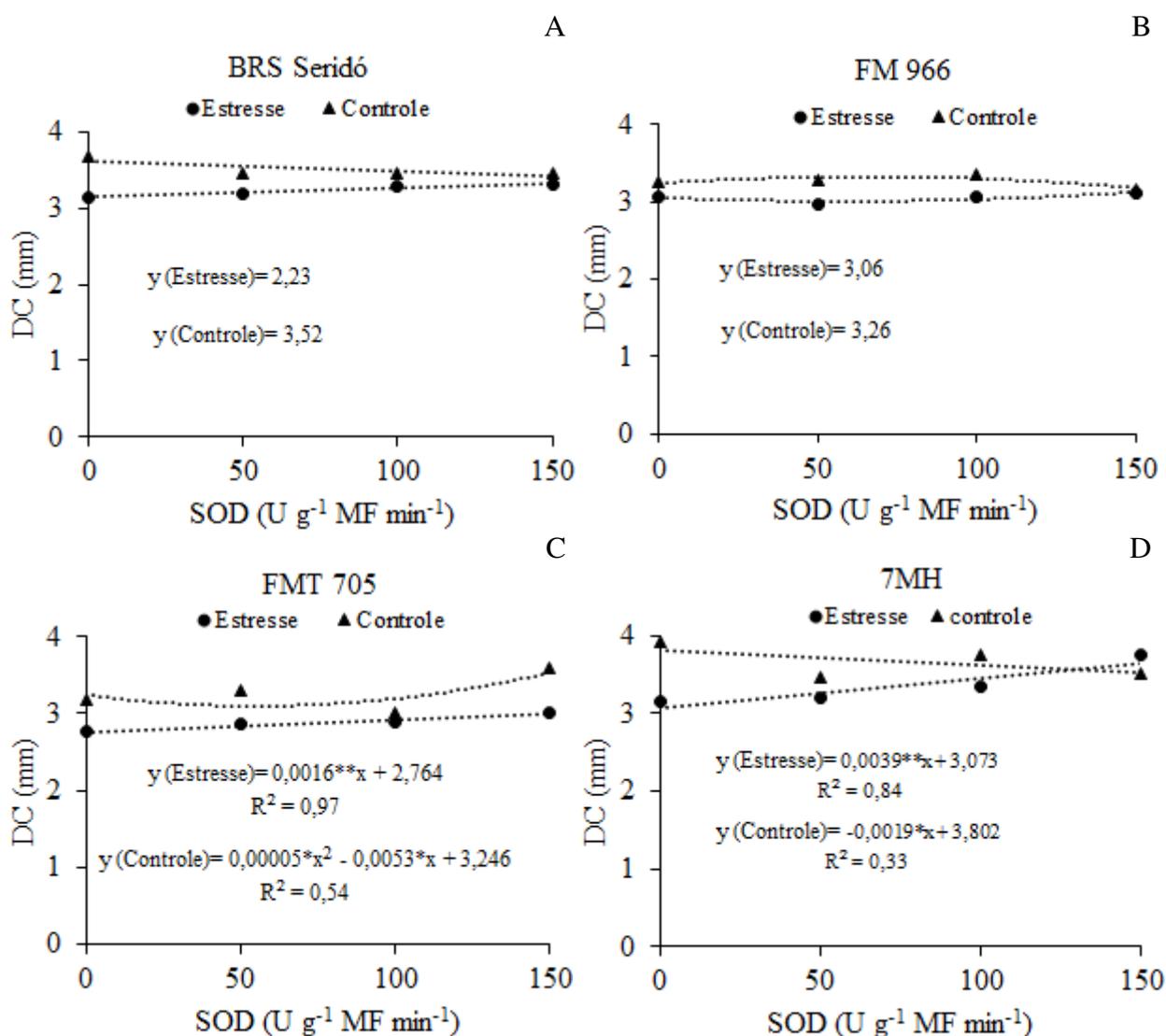
**Figura 4** – (A) Número de folhas dos quatro genótipos de algodoeiro, sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. Em 4B: NF dos genótipos, na interação com as concentrações de SOD, aos 27 DAS. Na Figura 4A, letras minúsculas iguais em cada genótipo são indicativos de não haver diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica; letras maiúsculas iguais entre genótipos indicam não haver diferenças entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey,  $p < 0,05$ ).

O número de folhas é uma variável muito contributiva na análise de crescimento, pois interfere diretamente na produção final da cultura, uma vez que, a abscisão de folhas e a redução da área foliar reduzem a absorção de radiação solar, com prejuízos no processo fotossintético (ARRUDA et al., 2002). No algodoeiro, a redução do dossel da planta (número e área das folhas) é uma consequência comum em plantas sob estresse hídrico e ocorre devido a um mecanismo fisiológico para diminuir a superfície transpirante e reduzir a perda de água para o ambiente (ARRUDA et al., 2002; MELONI et al., 2001; SALEH, 2012).

Com a interação tripla significativa ( $p < 0,01$ ), a prioridade foi para a sua discussão, fazendo-se desdobramento dos fatores em figuras por genótipo (Figuras 5A, 5B, 5C e 5D), para não ficarem agrupados em uma única figura, o que facilita a sua interpretação. Nos tratamentos sob estresse hídrico, à medida que se elevou a concentração de superóxido dismutase, houve tendência de aumento linear no diâmetro caulinar dos genótipos de algodoeiro, mas com efeito significativo apenas para ‘FMT 705’ (Figura 5C) e ‘CNPA 7MH’ (Figura 5D). Nesses genótipos ocorreu incremento de 8,7% e 19,0% em DC, respectivamente, quando as plantas receberam 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD, em relação à testemunha sem

aplicação da enzima (concentração zero). Para os demais genótipos estudados não houve diferença significativa.

A aplicação da superóxido dismutase nas plantas controle variou entre os genótipos, mas com baixo coeficiente de determinação. Ao final das variáveis de crescimento será feita uma discussão conjunta.

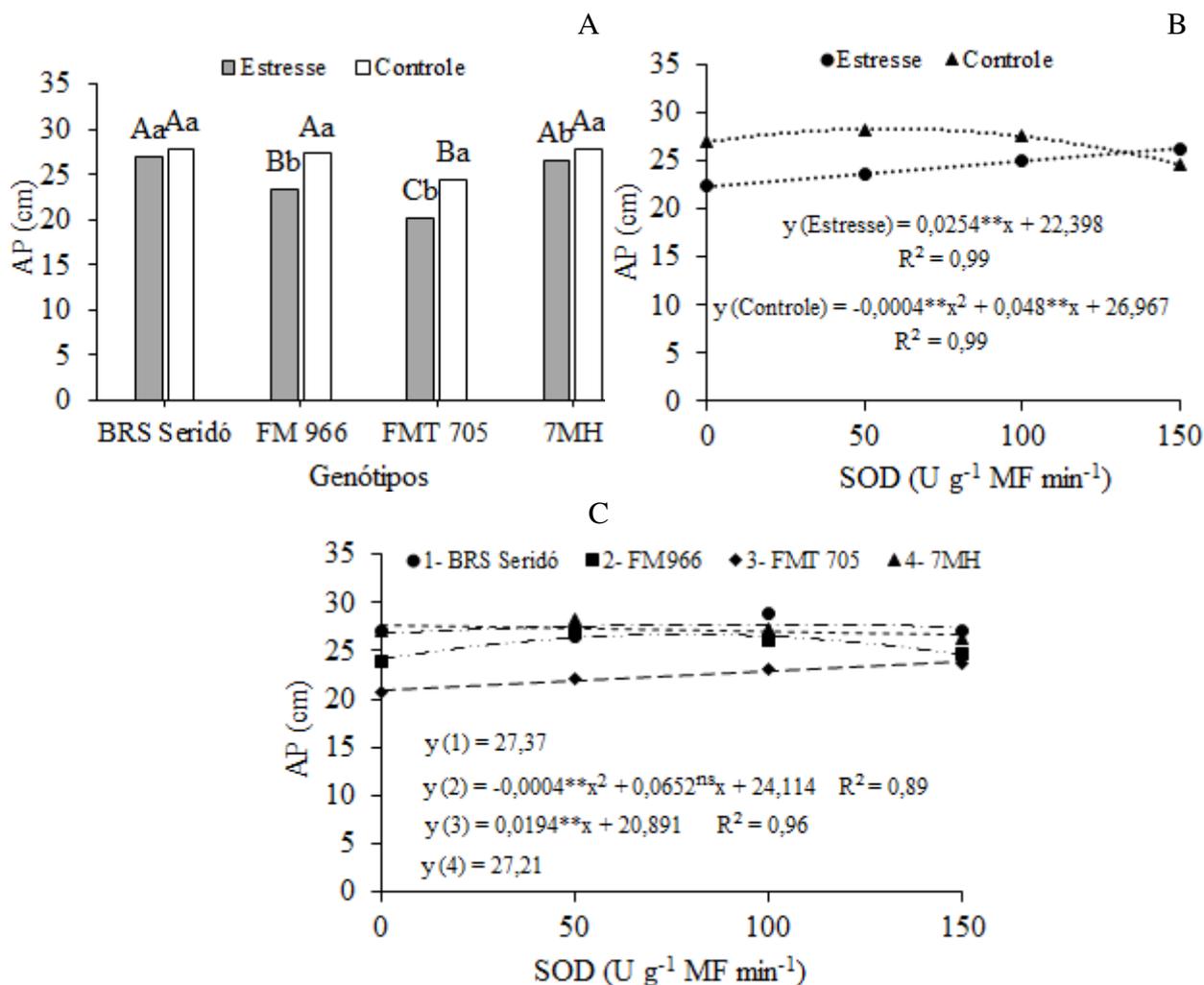


**Figura 5** – Diâmetro de caule de genótipos de algodoeiro (G) cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica (DH) e aplicação foliar de SOD, em diferentes concentrações, aos 27 DAS.

Relacionados às interações G x DH, G x S e DH x S, significativas para altura de planta (Tabela 4), aos 27 DAS, os dados estão na Figura 6. Na interação entre genótipos (G) e disponibilidade hídrica (DH) (Figura 6A), as plantas que passaram pelo estresse não diferiram das plantas que estavam sob irrigação plena no genótipo ‘BRS Seridó’, esse fato pode estar associado à base genética desse genótipo, obtido por meio da seleção direta aplicada sobre a

cultivar Embrapa 113 7MH, derivada de híbrido de algodão mocó x herbáceo (EMBRAPA, 2006). Nos demais genótipos, os tratamentos que receberam irrigação plena tiveram altura de planta maior que as plantas que estavam sob estresse hídrico.

Outro destaque é para os genótipos 'FM 966' e 'FMT 705', nos quais foram maiores as diferenças em altura entre as plantas do tratamento controle do que as que passaram por deficiência hídrica (Figura 6A). A maior redução verificada nesses genótipos condiz com a sua natureza genética, pois foram desenvolvidos para expressar maior potencial produtivo em ambientes de Cerrado, não adquirindo fatores herdáveis para tolerar o déficit hídrico que ocorre em áreas do semiárido nordestino (SOUZA et al., 2006; ROSOLEM et al., 2012; RODRIGUES et al., 2016). As reduções em altura, entre tratamentos de disponibilidade hídrica, chegaram a 14,1, 17,3 e 4,8% nas plantas não irrigadas dos genótipos 'FM 966', 'FMT 705' e 'CNPA 7MH', respectivamente. A menor redução no 'CNPA 7MH' se deve a um dos parentais ser o algodão Mocó, em cruzamento com o algodão herbáceo (EMBRAPA, 1997).



**Figura 6-** Altura de plantas de algodoeiros, correspondente às interações duplas G x DH (A), DH x S (B) e G x S (C) aos 27 DAS. Em 6A, letras minúsculas iguais não diferem entre si para DH no mesmo genótipo; letras maiúsculas diferentes distinguem efeitos significativos do mesmo fator de estresse (DH) entre genótipos, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Na análise da interação entre disponibilidade hídrica e concentrações de SOD (DH x S), os componentes de regressão estão na Figura 6B. O crescimento em altura das plantas que receberam a enzima foi linear e crescente, com aumento de 17,1% na concentração de 150 unidades ( $150 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ ), em comparação com o crescimento das que não receberam SOD. Nas plantas do controle, sem deficiência hídrica, o efeito da enzima foi quadrático, sem maior influência sobre o crescimento em altura, uma evidência da ação da SOD, em condições da planta sob estresse.

Quando desdobrada a interação G x S (genótipos x aplicação de SOD), constatou-se diferença significativa da aplicação de SOD, na altura dos genótipos FM 966 e FMT 705 (Figura 6C), portanto, sem efeito nas duas cultivares, BRS Seridó e 7MH, as mais adaptadas a

condições de seca. Justamente, nestas duas cultivares, mais adaptadas a condições sem irrigação, foram registrados os maiores valores de altura de planta, coincidindo com o tratamento sem SOD. No genótipo FM966, a maior altura foi de 26,7 cm na concentração estimada de  $81,5 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$  de SOD. Para o FMT 705, o crescimento foi linear à medida que aumentou a aplicação de SOD, com incremento de 14,1% na altura das plantas, quando relacionado a aplicação de  $0 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$  com a de  $150 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ .

Na análise conjunta das variáveis de crescimento, no contexto da aplicação de SOD, nota-se uma tendência de formação de dois grupos, o primeiro englobando os genótipos ‘BRS Seridó’ e ‘7MH’, mais adequados para cultivo no Nordeste, em regime de sequeiro, por sua origem em materiais genéticos envolvendo o algodão arbóreo Mocó, reconhecidamente mais tolerante à seca; no outro grupo estão os genótipos ‘FM 966’ e ‘FMT 705’, mais exigentes em água e recomendados para cultivo no Cerrado. No número de folhas, o maior destaque é para a ‘BRS Seridó’, uma cultivar oriunda por seleção da ‘7MH’. Depreende-se que na BRS Seridó, a prioridade do crescimento foi para a expansão da área fotossintetizante. Quando a variável envolvia o crescimento do caule, em diâmetro ou em altura, o efeito da SOD favoreceu os genótipos mais adaptados a condições de irrigação (‘FM 966’ e ‘FMT 705’), garantindo-lhes condições de crescimento em porte, possivelmente para assegurar um maior arcabouço, para folhas e frutos em etapas posteriores de crescimento.

Para eliminar o excesso de espécies reativas de oxigênio, as plantas fazem uso de mecanismos enzimáticos e não enzimáticos de desintoxicação celular, cuja velocidade de resposta representa o diferencial entre a tolerância ou sensibilidade ao estresse imposto (GILL e TUTEJA, 2010; BARBOSA et al., 2014). Tais processos devem ter ocorrido nos genótipos melhorados para o Cerrado, o diferencial para os efeitos positivos da SOD no crescimento do caule de suas plantas. No processo enzimático, uma das principais enzimas envolvidas é a superóxido dismutase (SOD), responsável pelo início do processo de neutralização de EROs, cujo papel é dismutar radicais  $\text{O}_2^{\cdot-}$  para  $\text{H}_2\text{O}_2$  e oxigênio ( $\text{O}_2$ ).

Rodrigues et al. (2016) avaliaram a atividade de enzimas antioxidantes em genótipos de algodão após estresse hídrico de sete dias e concluíram que FMT 705 e FM 966 não obtiveram *imput* necessário de SOD para desencadear o primeiro processo do complexo antioxidativo. Esse resultado, corrobora com o fato desses genótipos terem necessitado de maiores concentrações de SOD para se recuperarem do estresse hídrico.

A exposição a fatores de estresse ambiental, como o estresse hídrico, pode aumentar a produção de EROs, tais como oxigênio singlete ( $^1\text{O}_2$ ), radical superóxido ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ), peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e radical hidroxila ( $\text{OH}^{\cdot}$ ) (LISAR et al., 2012; BARBOSA et al., 2014). Se

as EROs não forem metabolizadas, excedem o status de antioxidantes e causam danos ao DNA, a proteínas, lipídios e outras macromoléculas e paralisam o metabolismo celular (HALLIWEL e GUTTERIDGE, 1989; HALLIWELL, 2006).

A introdução de SOD em resposta à condição de estresse hídrico desempenha um papel importante no mecanismo de defesa da planta. Pode ser um componente crucial e uma verdadeira plataforma, onde sua manipulação pode resultar em maior tolerância ao estresse (BRINI, 2014).

## 5.2. Fisiologia aos 27 DAS

### 5.2.1. Trocas gasosas de plantas de algodoeiros

Pelo resumo da análise de variância (Tabela 5), houve efeito significativo da interação entre os fatores (G x DH), sobre a transpiração (*E*), taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (*A*) e concentração interna de carbono (*Ci*). Na interação (DH x S), efeito significativo foi registrado para *E* e *A*. Enquanto que para os fatores G x S e G x DH x S, não foi observada interação significativa.

**Tabela 5.** Resumo da análise de variância para condutância estomática (*gs*), transpiração (*E*), fotossíntese (*A*), concentração interna de carbono (*Ci*) e eficiência intrínseca do uso da água (*EiUA*), dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e suplementação exógena de superóxido dismutase, aos 27 DAS. Campina Grande, 2021.

F. Variação	GL	Quadrados médios				
		<i>gs</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>Ci</i>	<i>EiUA</i>
Genótipos (G)	3	0,001 <sup>ns</sup>	18,469 <sup>**</sup>	15,667 <sup>**</sup>	909,544 <sup>*</sup>	125,245 <sup>**</sup>
D. hídrica (DH)	1	0,109 <sup>**</sup>	8,912 <sup>**</sup>	16,922 <sup>**</sup>	14235,539 <sup>**</sup>	28,570 <sup>**</sup>
SOD (S)	3	0,019 <sup>**</sup>	0,767 <sup>**</sup>	2,244 <sup>**</sup>	2846,051 <sup>**</sup>	6,171 <sup>*</sup>
Interação (G x DH)	3	0,002 <sup>ns</sup>	0,516 <sup>**</sup>	0,604 <sup>**</sup>	826,856 <sup>*</sup>	1,705 <sup>ns</sup>
Interação (G X S)	9	0,001 <sup>ns</sup>	0,070 <sup>ns</sup>	0,165 <sup>ns</sup>	72,353 <sup>ns</sup>	3,069 <sup>ns</sup>
Interação (DH X S)	3	0,000 <sup>ns</sup>	0,239 <sup>*</sup>	0,673 <sup>**</sup>	554,012 <sup>ns</sup>	1,460 <sup>ns</sup>
Interação (G x DH x S)	9	0,001 <sup>ns</sup>	0,044 <sup>ns</sup>	0,153 <sup>ns</sup>	281,953 <sup>ns</sup>	3,667 <sup>ns</sup>
Bloco	3	0,001 <sup>ns</sup>	0,129 <sup>ns</sup>	0,134 <sup>ns</sup>	941,901 <sup>*</sup>	0,974 <sup>ns</sup>
Resíduo	95	0,001	0,078	0,143	255,925	2,198
CV (%)	-	4,3	12,8	12,9	7,5	17,6

CV- Coeficiente de variação; GL- Graus de liberdade; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup> - não significativo.

Houve redução de 7,3% na condutância estomática das plantas de algodoeiro submetidas ao estresse hídrico (deficiência hídrica) em relação às plantas controle (Figura 7A). Salienta-se que a diminuição na *gs* em consequência do estresse hídrico, significa aumento da resistência estomática para manutenção do potencial hídrico nas folhas. É necessário lembrar, que essa redução ocorre a custos de energia, limitando o crescimento e

desenvolvimento dos vegetais. Dessa forma, é possível afirmar que a condutância estomática em algodão é responsiva à queda da umidade do solo, ressaltando-se que, no presente estudo, essa resposta foi dependente também do genótipo utilizado, como afirmaram PARIDA e DAS (2009).

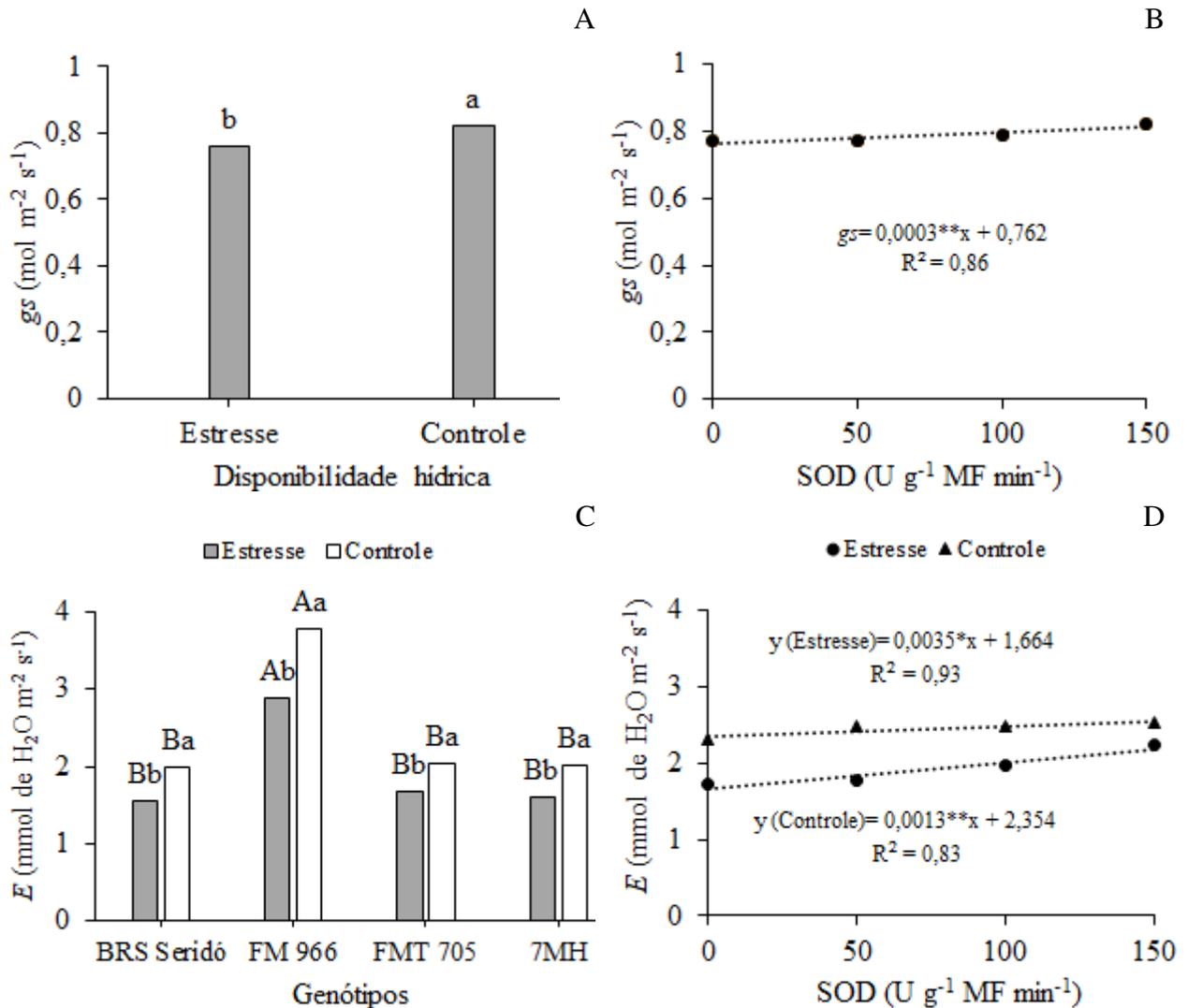
Esses resultados corroboram com os da literatura, principalmente em plantas C3, como o algodoeiro, por serem os estômatos responsáveis diretos pela regulação das trocas gasosas, de modo que o fechamento restringe o fluxo de CO<sub>2</sub> e a taxa transpiratória, comprometendo a eficiência instantânea no uso da água (SILVA et al., 2014; SÁ et al., 2015).

Quando estudada a aplicação de SOD de forma isolada (Figura 7B), verifica-se que o modelo que melhor se ajustou ao conjunto de dados médios foi o linear, sendo esse parâmetro fisiológico influenciado positivamente pela aplicação exógena de SOD quando comparado a menor (0 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup>) com a maior (150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup>) concentração de SOD, com incremento de 6,5%.

Quando estudado o desdobramento da interação G x DH (Figura 7C), observa-se redução na transpiração para todos os genótipos, quando comparado o tratamento estresse (deficiência hídrica) em relação ao controle. Ao comparar taxa de transpiração entre os genótipos em plantas sob condições de estresse, o genótipo FM 966, comportou-se de forma diferente dos demais, obtendo maior média de transpiração (3,78 mmol de H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>).

À medida que as plantas sob estresse hídrico foram submetidas à aplicação de concentrações crescentes da enzima superóxido dismutase (Figura 7D), evidencia-se efeito linear crescente na transpiração, com aumento de 30,2% ao comparar a aplicação de 0 e 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD. Quando aplicado a SOD nas plantas controle, também se observa crescimento de 9,0% ao comparar a menor e maior concentração de SOD.

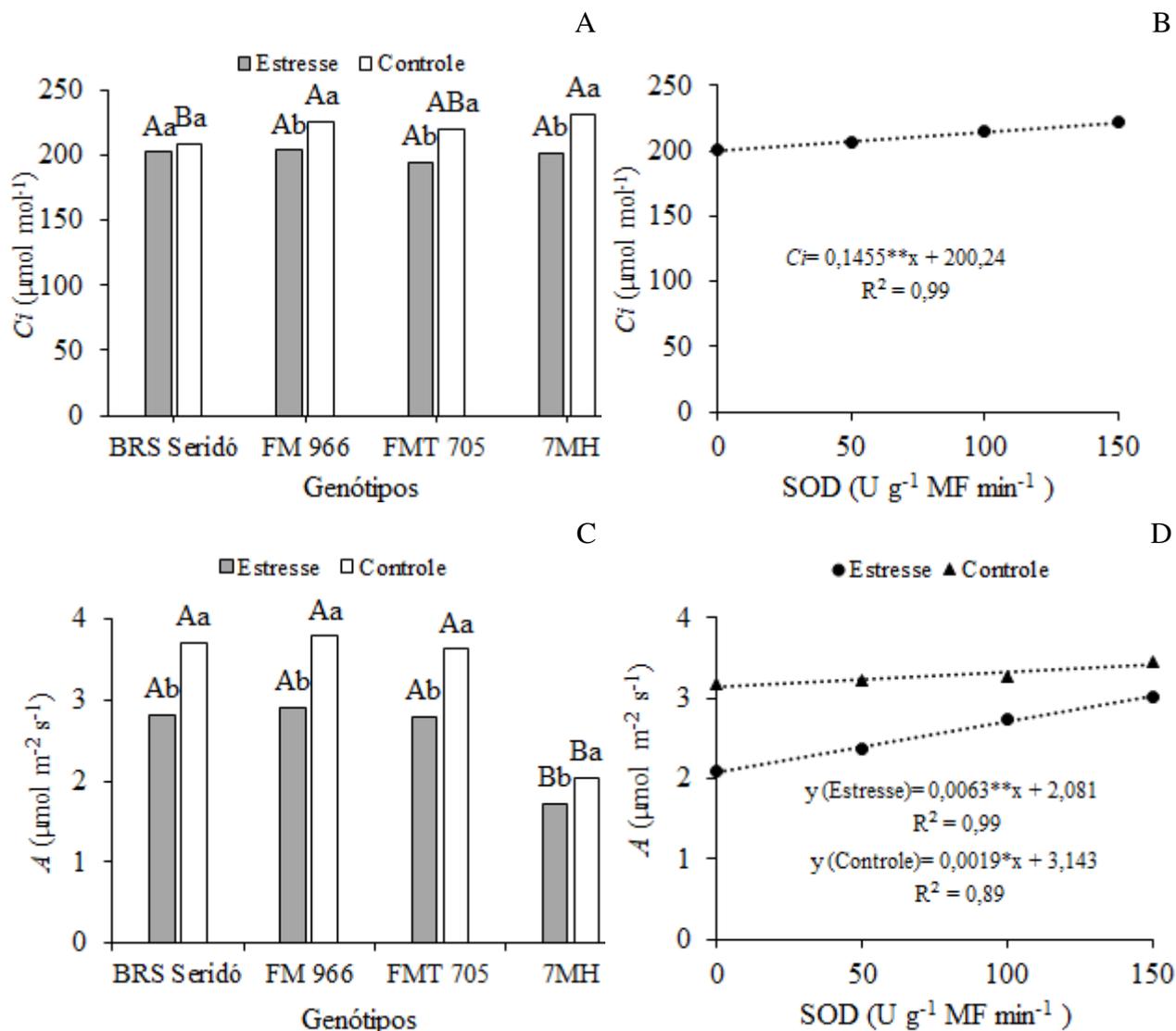
De acordo com Brito et al. (2011), mesmo pertencendo a uma só espécie, os genótipos de algodoeiro podem desencadear mecanismos de tolerância diferentes em resposta ao estresse hídrico. Isso justifica o comportamento diferenciado verificado para o FM 966, genótipo herbáceo desenvolvido para região de cerrado, recomendado para manejo com alto nível tecnológico.



**Figura 7-** (A) Condutância estomática ( $g_s$ ) do algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (B) condutância estomática do algodoeiro sob aplicações foliares de SOD. (C) transpiração ( $E$ ) dos quatros genótipos de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (D) transpiração de algodoeiros cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS. Na Figura 7A e 7C letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre os tratamentos de disponibilidade hídrica e letras maiúsculas iguais entre genótipos indica não haver diferença entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey  $p < 0,05$ ).

Para concentração interna de carbono (Figura 8A), verifica-se diferença significativa entre as plantas sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e as plantas controle, para os genótipos FM 966, FMT 705 e 7MH. O tratamento com estresse hídrico (deficiência hídrica), reduziu a concentração interna de carbono 9,58, 11,9 e 12,8% respectivamente para os genótipos FM 966, FMT 705 e 7MH, quando comparado ao tratamento controle. Não houve diferença média significativa entre os tratamentos de disponibilidade hídrica para o genótipo

BRS Seridó, sugerindo que esse material foi tolerante ao tempo de estresse em que a planta foi submetida. Porém, para as diferentes concentrações de SOD, houve aumento de 10,5% na concentração interna de CO<sub>2</sub> quando comparado a menor e a maior concentração de SOD (Figura 8B).



**Figura 8.** (A) Concentração interna de carbono ( $C_i$ ) dos quatro genótipos de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (B) Concentração interna de carbono ( $C_i$ ) do algodoeiro sob aplicações foliar de SOD. (C) taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> dos quatro genótipos de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (D) taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> de algodoeiros cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS. Na Figura 8A e 8C letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre os tratamentos de disponibilidade

hídrica e letras maiúsculas iguais entre genótipos indica não haver diferença entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey  $p < 0,05$ ).

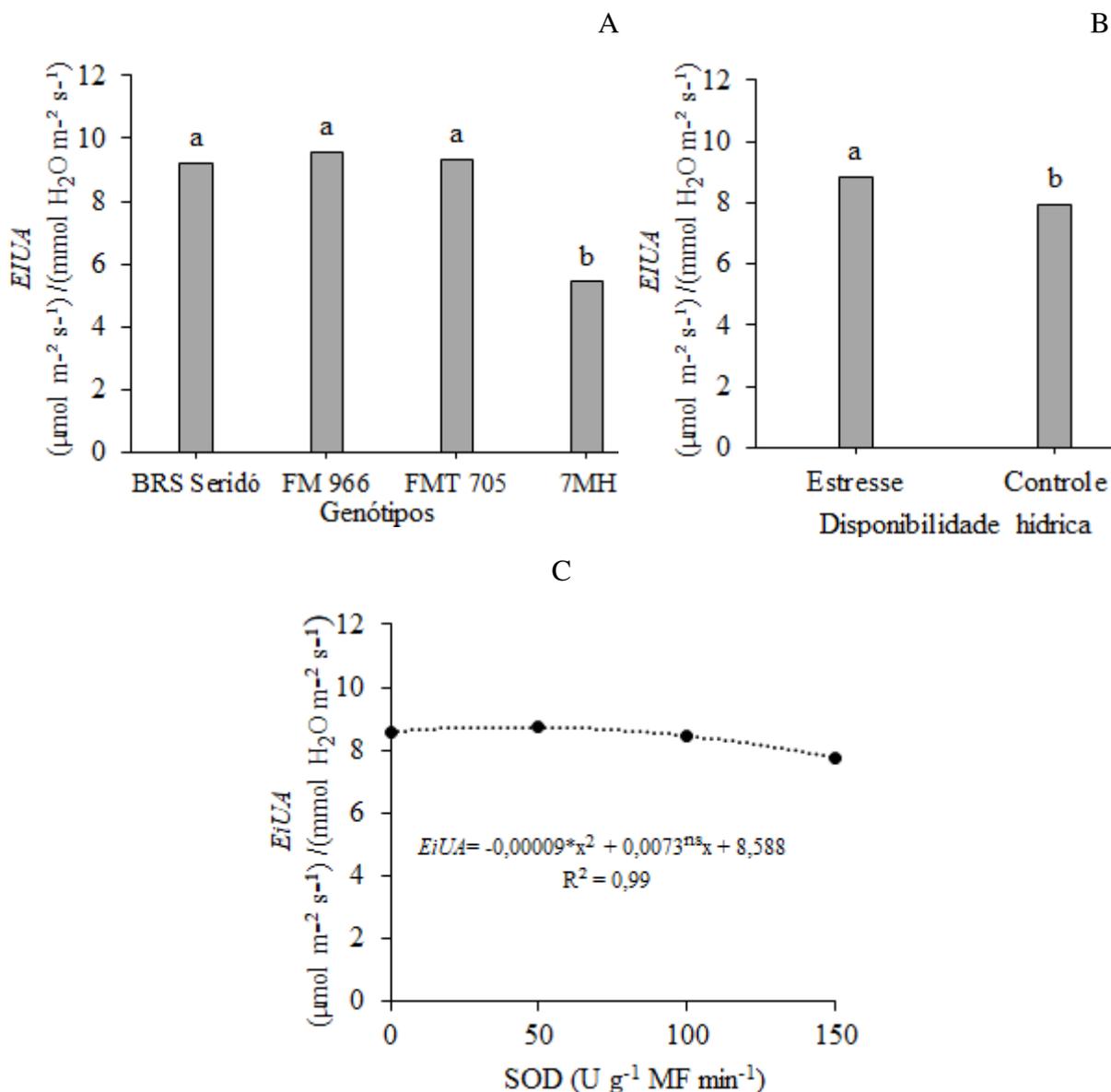
Segundo Machado et al. (2009), o decréscimo em  $C_i$  pode acarretar queda na taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  devido à redução na concentração de  $\text{CO}_2$  para atividade da ribulose-1,5- -bisfosfato carboxilase- oxigenase (rubisco), mas tal fato não ocorreu neste trabalho. Shimazaki et al. (2007) reportaram que a assimilação de dióxido de carbono do meio externo promove perda de água, e que a diminuição desta perda também restringe a entrada de  $\text{CO}_2$ .

A redução na concentração interna de carbono, resultou na diminuição da taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  (Figura 8C) dos genótipos quando submetidos ao estresse hídrico (deficiência hídrica), reduzindo 23,7; 23,2; 23,1 e 15,6% quando comparado o déficit hídrico em relação a irrigação plena (controle) para os genótipos BRS Seridó, FM 966, FMT 705 e 7MH, respectivamente. Porém, quando da aplicação de SOD nas plantas sob deficiência hídrica, verificou-se equação de regressão linear crescente (Figura 8D), a partir de 2,09  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (0 U  $\text{g}^{-1}$  MF  $\text{min}^{-1}$  de SOD) até 3,02  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (150 U  $\text{g}^{-1}$  MF  $\text{min}^{-1}$  de SOD), com aumento de 44,4% na taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$ .

Esses resultados da taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  estão em consonância com os de condutância estomática ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ), uma vez que, a maior abertura estomática favorece a taxa transpiratória, conseqüentemente, maior taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$ .

Para a eficiência instantânea do uso da água, observa-se efeito significativo dos fatores isolados. Os genótipos BRS Seridó, FM 966 e FMT 705 foram mais eficientes no uso da água em relação ao 7MH, aumentando 70, 76,5 e 71,7%, respectivamente (Figura 9A). Ao comparar os tratamentos de disponibilidade hídrica, constatou-se que as plantas sob deficiência hídrica foram 11,8% mais eficientes no uso da água em relação a irrigação plena (controle) (Figura 9B).

O modelo que melhor se ajustou ao conjunto de dados médios para eficiência instantânea do uso da água foi o quadrático, obtendo um ajuste de 99% (Figura 6C). Essas informações implicam que 99% das variações ocorridas no parâmetro  $EiUA$  estão relacionadas com a aplicação da enzima SOD. A concentração máxima estimada para  $EiUA$  foi 40,5 U  $\text{g}^{-1}$  MF  $\text{min}^{-1}$  de SOD, obtendo média de 8,73 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) / ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Percebe-se que concentrações superiores a máxima estimada, podem acarretar redução na  $EiUA$  das plantas de algodão.



**Figura 9.** (A) Eficiência instantânea do uso da água (*EiUA*) de quatro genótipos de algodoeiros. (B) Eficiência instantânea do uso da água (*EiUA*) de algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena. (C) Eficiência instantânea do uso da água (*EiUA*) de algodoeiro sob aplicação foliar de SOD, ao 27 DAS. Na figura 9A letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre os genótipos. Na Figura 9B letras minúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre disponibilidade hídrica (Deficiência hídrica e irrigação plena) (Tukey  $p < 0,05$ ).

Para Jaimez et al. (2005), a relação entre a fotossíntese e a transpiração indica a eficiência instantânea no uso de água (*EiUA*), em que os valores observados relacionam a quantidade de carbono que a planta fixa, por cada unidade de água que perde. Neste sentido, os decréscimos observados na *EiUA* para as maiores concentrações de SOD, bem como para o genótipo 7MH de forma isolada, são reflexos dos aumentos observados na taxa de assimilação

de CO<sub>2</sub> e na transpiração das plantas. Outra possibilidade, pode estar atrelada a influência das condições climáticas sobre as trocas gasosas das plantas (Melo et al. 2010; Taiz et al., 2017).

## 5.2.2. Fluorescência

### 5.2.2.1. Variáveis fotoquímicas

Em fluorescência inicial ( $F_o$ ) e a fluorescência máxima ( $F_m$ ), constataram-se efeitos significativos das interações G x DH e DH x S. Para fluorescência variável ( $F_v$ ) e eficiência quântica do PSII ( $F_v/F_m$ ) houve interação entre os fatores G x DH, G x S e DH x S (Tabela 6).

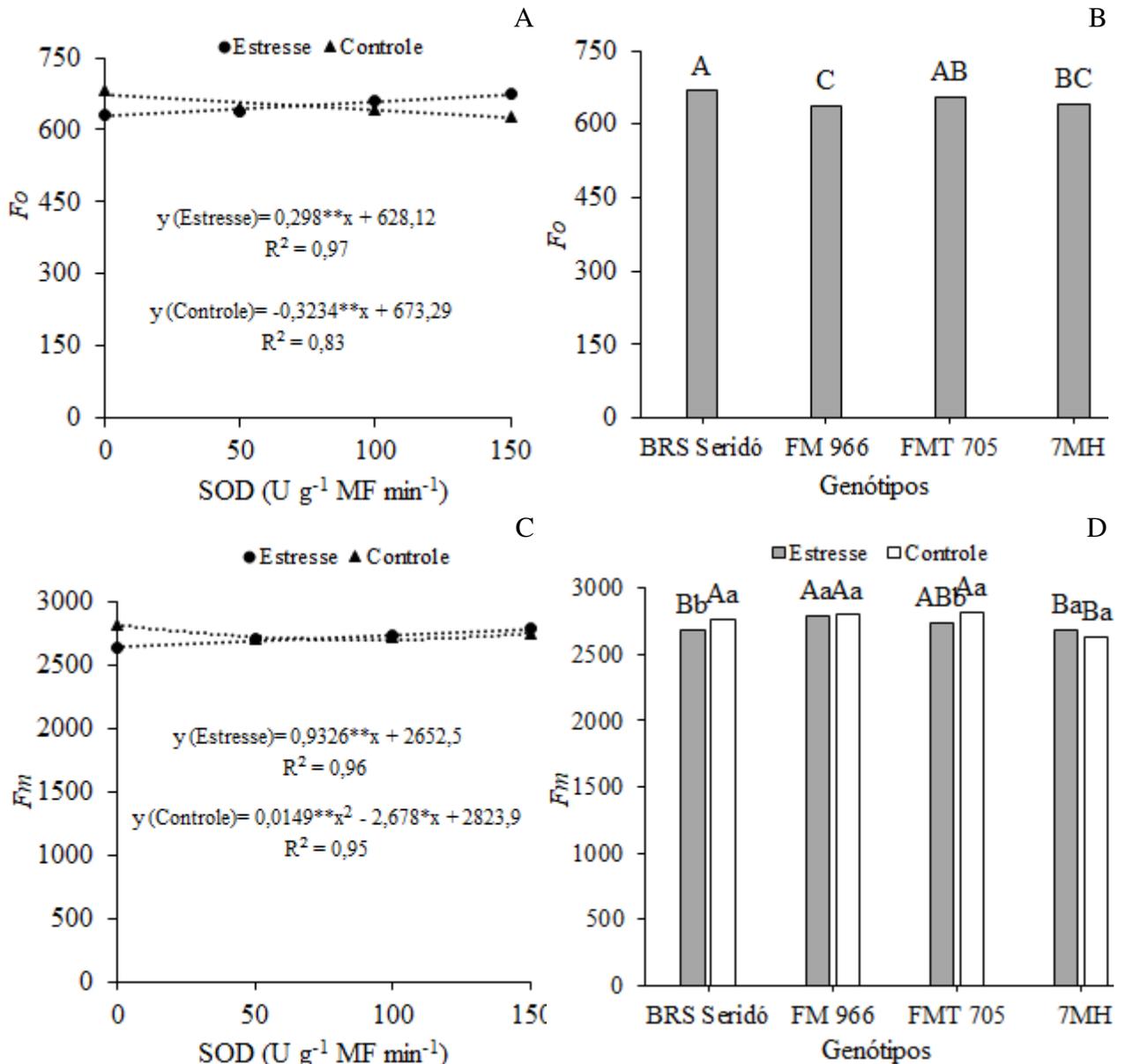
**Tabela 6.** Resumo da análise de variância para fluorescência inicial ( $F_o$ ), máxima ( $F_m$ ), variável ( $F_v$ ), eficiência quântica ( $F_v/F_m$ ) dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e suplementação exógena de superóxido dismutase, aos 27 DAS. Campina Grande, 2021.

F. Variação	GL	Quadrados médios			
		$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_m$
Genótipos (G)	3	6798,8**	128023,895**	95073,2**	0,0013**
D. Hídrica (DH)	1	68,12 <sup>ns</sup>	30442,781*	60247,8**	0,0032**
SOD (S)	3	1395,17 <sup>ns</sup>	20255,875*	17257,3*	0,0001 <sup>ns</sup>
Interação (G x DH)	3	1867,30 <sup>ns</sup>	35142,802**	20017,6*	0,0002**
Interação (G X S)	9	825,45 <sup>ns</sup>	5410,937 <sup>ns</sup>	13040,96*	0,0001*
Interação (DH X S)	3	13181**	85357,614**	61217,4*	0,0002*
Interação (G x DH x S)	9	756,21 <sup>ns</sup>	7009,746 <sup>ns</sup>	72,67,7 <sup>ns</sup>	0,00009 <sup>ns</sup>
Bloco	3	545,87 <sup>ns</sup>	9544,562 <sup>ns</sup>	10181,9 <sup>ns</sup>	0,00005 <sup>ns</sup>
Resíduo	95	752,99	6577,444	5940,34	0,00005
CV (%)	-	4,2	2,96	3,70	0,99

CV- Coeficiente de variação; GL- Graus de liberdade; \*\* e \* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup> - não significativo.

A fluorescência inicial ( $F_o$ ) das plantas de algodoeiro submetidas ao estresse hídrico (deficiência hídrica), teve aumento de 6,7% quando comparado a menor com a maior concentração de SOD. Contudo, à medida que foi elevada a concentração de SOD nas plantas com irrigação plena (controle), observou-se redução de aproximadamente 8,0% na  $F_o$  (Figura 10A). Quando comparada a aplicação de SOD nos tratamentos de disponibilidade hídrica, verificou-se que a fluorescência inicial ( $F_o$ ) das plantas submetidas ao estresse hídrico (deficiência hídrica), teve acréscimo de 3,6% em relação às plantas do tratamento irrigação plena (controle) quando aplicadas 150 unidades de SOD.

Em relação aos quatro genótipos estudados, o BRS Seridó diferiu estatisticamente do 7MH e do FM 966, e não diferiu do FMT 705 (Figura 7B). A diferença na taxa de fluorescência inicial entre o BRS Seridó e o 7MH foi de 4,4% a mais para BRS Seridó.



**Figura 10** – (A) Fluorescência inicial ( $F_o$ ) do algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena na interação com as concentrações de SOD. (B) Fluorescência inicial ( $F_o$ ) de quatro genótipos de algodoeiro. (C) Fluorescência máxima ( $F_m$ ) do algodoeiro sob estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena na interação com as concentrações de SOD. (D) Fluorescência máxima ( $F_m$ ) dos genótipos na interação com estresse hídrico (deficiência hídrica) e irrigação plena, aos 27 DAS. Na Figura 10B letras maiúsculas iguais são indicativos de não haver diferença entre genótipos. Na Figura 10D letras minúsculas iguais em cada genótipo são indicativos de não haver diferença significativa entre os tratamentos de disponibilidade hídrica; letras maiúsculas iguais entre genótipos indicam não haver diferença entre eles na mesma condição de irrigação (Tukey  $p < 0,05$ ).

Para a fluorescência máxima (Figura 10C), as plantas sob estresse aumentaram linearmente à medida que se elevou as concentrações de SOD. Quando aplicado  $150\ U\ g^{-1}\ MF$

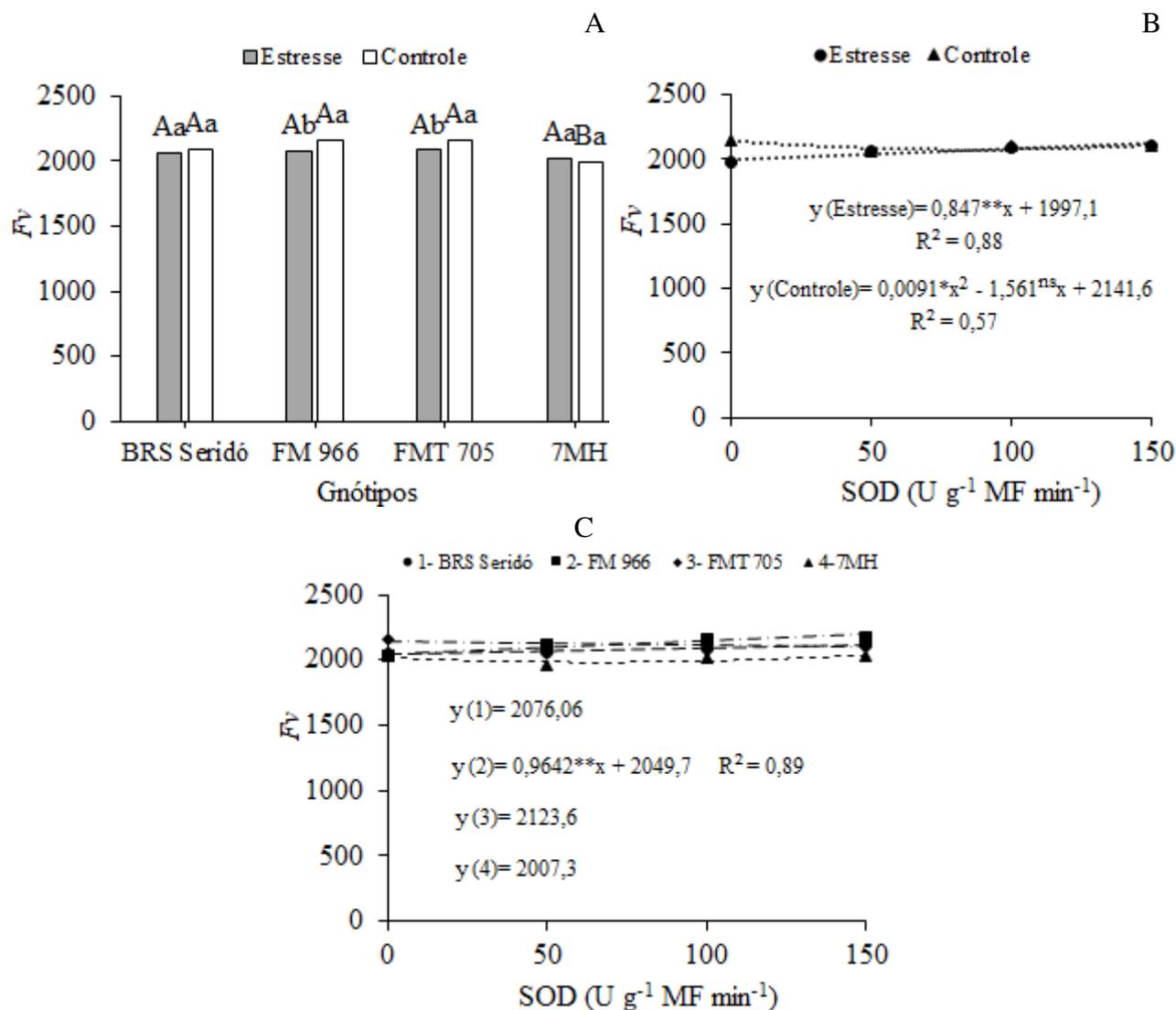
$\text{min}^{-1}$  de SOD houve aumento de 5,6% na  $Fm$  em comparação ao tratamento sem SOD ( $0 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ ), seguindo assim a mesma tendência dos resultados da  $Fo$ .

O aumento verificado na  $Fm$  nas plantas que receberam superóxido dismutase, justifica-se pela otimização da capacidade de absorção e aproveitamento da energia luminosa pelo fotossistema II (TORRES NETTO; CAMPOSTRINI; OLIVEIRA, 2005). Acrescenta-se que o aumento da fluorescência máxima está relacionado à maior eficiência de fotorredução da quinona  $a$  indicando boa atividade do FSII na membrana dos tilacóides, o que reflete diretamente no fluxo de elétrons entre os fotossistemas (SILVA et al., 2006).

Para a interação entre G x DH (Figura 10D), constatou-se diferença significativa entre o tratamento de deficiência hídrica e irrigação plena (controle) nos genótipos BRS Seridó e FM 705, com reduções de 3,0 e 2,9%, respectivamente.

Na fluorescência variável ( $Fv$ ) (Figura 11A), houve diferença significativa entre os tratamentos de disponibilidade hídrica para os genótipos FM 966 e FMT 705, com maiores taxas na  $Fv$  nas plantas cultivadas sob irrigação plena. Os demais genótipos foram estatisticamente iguais.

Quando da aplicação de SOD, nas plantas sob estresse hídrico, a fluorescência variável (Figura 11B), seguiu a mesma tendência da fluorescência inicial e da fluorescência máxima, com equação de regressão linear significativa entre as concentrações, a partir de 1977,9 elétrons quantum<sup>-1</sup> ( $0 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$  de SOD) até 2110,0 elétrons quantum<sup>-1</sup> ( $150 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$  de SOD).



**Figura 11** – Fluorescência variável ( $F_v$ ) de plantas de algodoeiro correspondente as interações duplas G x DH (A), DH x S (B) e G x S (C), aos 27 DAS. Em 11A letras minúsculas iguais não diferem entre si para disponibilidade hídrica no mesmo genótipo; letras maiúsculas diferente distingue efeito significativo do mesmo fator de estresse (DH) estes genótipos (Tukey  $p < 0,05$ ).

Para a interação G x S (Figura 11C), observou-se diferença significativas entre as concentrações de SOD no genótipo FM 966, com registro da equação de regressão linear crescente, variando de 2029,0 elétrons quantum<sup>-1</sup> (0 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD) até 2176,7 elétrons quantum<sup>-1</sup> (150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD) na  $F_v$ .

Dias e Marengo (2007) reportam que as características de fluorescência são utilizadas como indicativo de estresses bióticos e abióticos, notadamente, pelo dano causado por esses fatores ao pleno funcionamento do FSII. Assim, esse aumento verificado na fluorescência máxima, onde as plantas com e sem estresse não apresentaram diferença significativa em

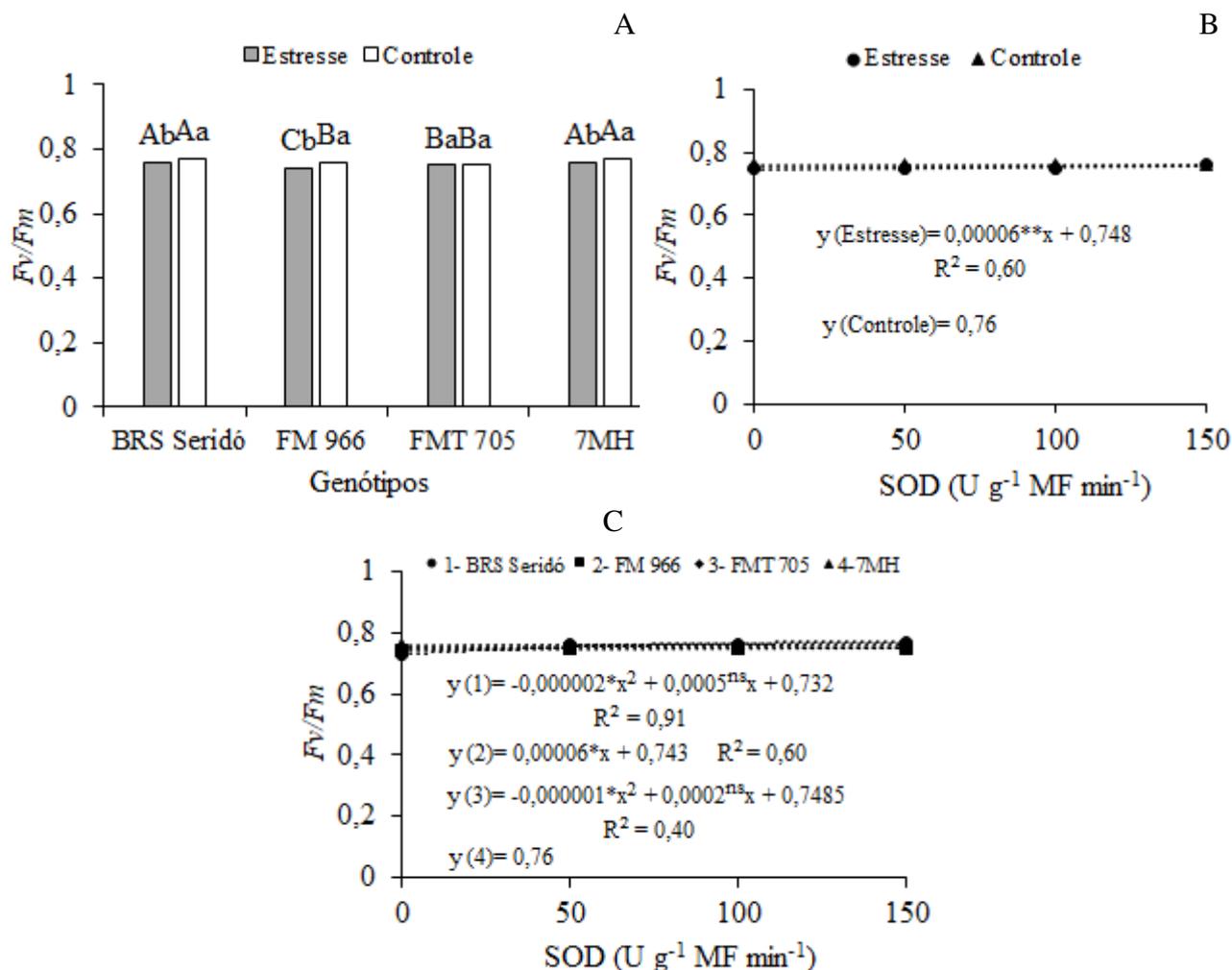
resposta ao incremento da concentração de SOD aplicada, indica maior estabilidade das plantas e consequente proteção ao estresse hídrico.

Segundo KRAUSE E WEISS (1991) a fluorescência inicial ( $F_0$ ) representa a fluorescência com todos os centros de reação abertos e refere-se à emissão da fluorescência pelas moléculas de clorofila *a* do complexo coletor de luz do fotossistema II (FSII). De acordo com BJÖRKMAN E DEMMING (1987) a fluorescência máxima ( $F_m$ ) indica a completa redução da quinona A (QA) a partir da incidência de um pulso de luz no centro de reação QA, gerando fluorescência máxima. A diferença entre ( $F_m$ ) e ( $F_0$ ) resulta na fluorescência variável ( $F_v$ ). A  $F_v$  representa o fluxo de elétrons do centro de reação do FSII (P680) até a plastoquinona (PQH2). A fluorescência da clorofila *a* pode ser usada para estimar a eficiência do transporte de elétrons através do fotossistema II (FSII), e a eficiência de operação deste fotossistema está correlacionado a assimilação de CO<sub>2</sub> (MOUGET; TREMBLIN, 2002).

Para a eficiência quântica do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ), observou-se que no genótipo FMT 705 não houve diferença significativa entre os tratamentos de disponibilidade hídrica. Nos demais genótipos, houve redução de 1,2% (BRS Seridó), 2,6% (FM 966) e 1,2% (7MH) (Figura 12A).

A eficiência quântica do FSII pode ser utilizada para indicar estresse nos vegetais. Nesse sentido, a diminuição da relação  $F_v/F_m$  nas plantas sob estresse hídrico (Figura 12A) indica distúrbios na eficiência fotoquímica.

A aplicação de SOD foi eficaz em aumentar a eficiência quântica do fotossistema II, quando as plantas de algodoeiro foram submetidas a deficiência hídrica (Figura 12B). O incremento na  $F_v/F_m$  foi 1,9% quando comparado a menor ( $0 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ ) com a maior ( $150 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ ) concentração de SOD. O aumento da eficiência quântica do FSII indica melhor aproveitamento e conversão da energia luminosa.



**Figura 12** - Eficiência quântica do fotossistema II ( $Fv/Fm$ ) de plantas de algodoeiro correspondente as interações duplas G x DH (A), DH x S (B) e G x S (C), aos 27 DAS. Em 11A letras minúsculas iguais não diferem entre si para disponibilidade hídrica no mesmo genótipo; letras maiúsculas diferente distingue efeito significativo do mesmo fator de estresse (DH) estes genótipos (Tukey  $p < 0,05$ ).

Ao se observar o desdobramento da interação G x S (Figura 12C), constata-se diferença significativa em todos os genótipos, exceto '7MH'. A eficiência quântica do PSII ( $Fv/Fm$ ) dos genótipos BRS Seridó e o FMT 705 que receberam a SOD foi de ordem quadrática, com médias 0,76 e 0,75 estimadas na concentração de 125 e 100 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de SOD, respectivamente. O genótipo FM 966, teve aumento linear de 1,3%.

A eficiência quântica do FSII pode ser utilizada para indicar estresse nos vegetais. Nesse sentido, a diminuição da relação  $Fv/Fm$  indica distúrbios na eficiência fotoquímica. Essa informação é ratificada por MELO et al. (2010) e SUASSUNA et al. (2011) quando os autores registraram redução na  $Fv/Fm$  em melancia e meloeiro, respectivamente, submetidos à condição de estresse por saturação hídrica. POSADA, OLMOS E ULRICHS

(2011) ressaltam que a relação  $Fv/Fm$  caracteriza a eficiência fotoquímica das culturas e indica pleno funcionamento do aparato fotossintético das plantas. Assim, o aumento da eficiência quântica do FSII indica melhor aproveitamento e conversão da energia luminosa.

### 5.3. Acúmulo de massa em plantas de algodoeiro

Pelo resumo da análise de variância (Tabela 7), observou-se efeito significativo da interação tripla entre os fatores em estudo sobre massa seca da parte aérea (MSPA) e a relação raiz parte aérea (R/PA). A massa seca de raiz foi influenciada pela interação G x S e DH x S.

**Tabela 7.** Resumo da análise de variância para massa seca de raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e relação raiz parte aérea (R/PA) dos genótipos de algodoeiro submetidos ao estresse hídrico e aplicação de superóxido dismutase, aos 27 DAS

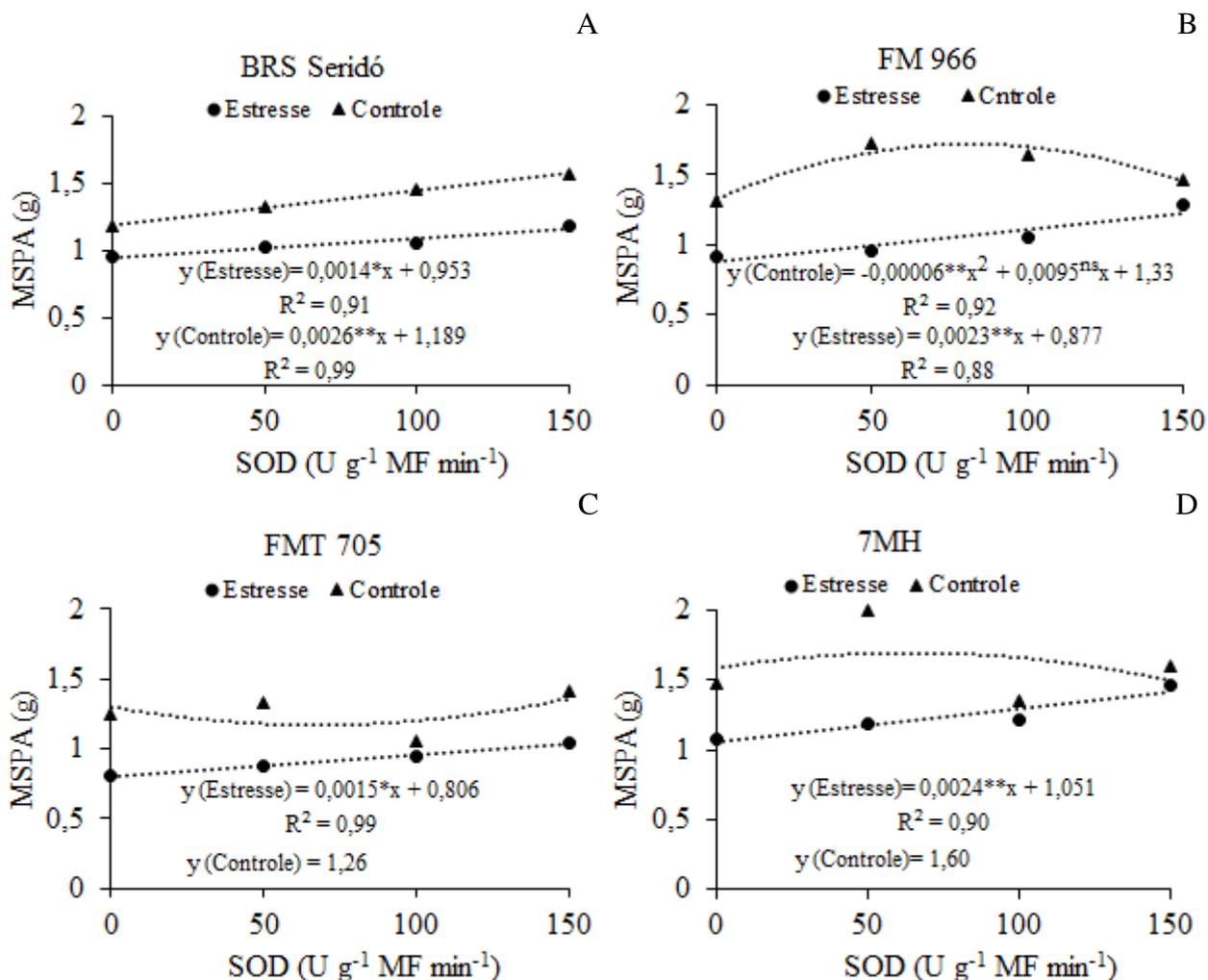
Fontes de variação	GL	Quadrados médios		
		MSR	MSPA	R/PA
Genótipo (G)	3	0,02**	0,60**	0,017**
D. Hídrica (DH)	1	0,001 <sup>ns</sup>	4,63**	0,078**
SOD (S)	3	0,011**	0,37**	0,007**
Interação (G x DH)	3	0,002 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,002*
Interação (G x S)	9	0,009**	0,05*	0,006**
Interação (DH X S)	3	0,06**	0,15**	0,047**
Interação (G x DH x S)	9	0,002 <sup>ns</sup>	0,08**	0,002**
Bloco	3	0,002 <sup>ns</sup>	0,016 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>
Resíduo	95	0,305	0,03	0,0007
CV (%)	-	7,97	11,61	15,63

CV- Coeficiente de variação; GL- Graus de liberdade; \* e \*\* - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente. <sup>ns</sup> - não significativo.

Houve aumento linear na massa seca da parte aérea dos quatro genótipos de algodoeiro, quando submetido a deficiência hídrica e tratados com superóxido dismutase (Figura 13), aumentando 22,9% (BRS Seridó), 39,1% (FM 966), 28,3% (FMT 705) e 40,3% para o 7MH, quando comparado a menor ( $0 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ ) com a maior ( $150 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ ) concentração de SOD, confirmando que a suplementação com SOD foi eficaz na atenuação do estresse hídrico.

A MSPA produzida pela BRS Seridó em condições de deficiência não diferiu da que foi produzida em condições de irrigação plena (controle). Os demais genótipos foram explicados pela equação quadrática, A MSPA dos obtendo um ponto de máxima que beneficiou a planta sob aplicação de SOD. O maior acúmulo de massa da parte aérea do FM 966 foi 1,50 g na concentração estimada de  $79,1 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$  de SOD. Para o genótipo 7MH a concentração de SOD máxima estimada foi de  $50 \text{ U g}^{-1} \text{ MF min}^{-1}$ , obtendo massa

média da parte aérea de 1,65 gramas. Nas plantas sob estresse, a SOD teve efeito linear e crescente, ficando uma expectativa para ser favorável o aumento da concentração da enzima.

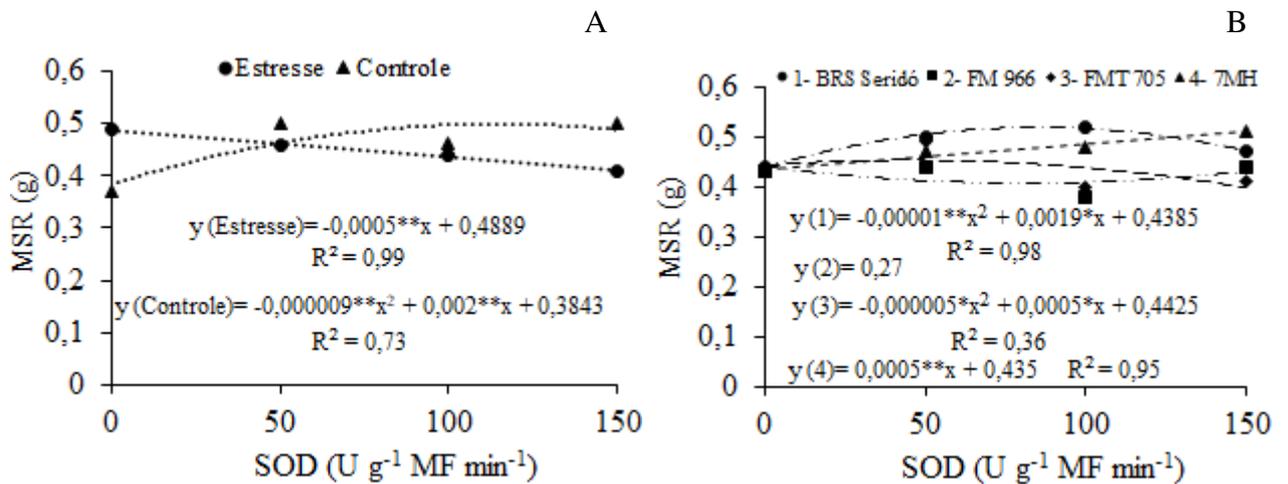


**Figura 13.** Massa seca da parte aérea (MSPA) de genótipos de algodoeiro (G) cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica (DH) e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS.

Para a interação S x DH, verificou-se redução na massa seca de raiz quando do tratamento com SOD nas plantas sob deficiência hídrica. Enquanto o tratamento sem SOD obteve maior massa de raiz. Isso provavelmente ocorreu em virtude de que as plantas quando sinalizadas de algum estresse tendem a aprofundar o sistema radicular e consequentemente acelerar o ciclo de vida a fim de perpetuar a espécie. As demais concentrações podem ter sinalizado uma possível atenuação do estresse imposto à planta fazendo com que ela não acelerasse os seus processos fisiológicos (Figura 14A).

O acúmulo de massa seca de raiz no tratamento com SOD foi significativo de ordem quadrático nos genótipos BRS Seridó, FMT 705, com médias de 0,52 e 0,45 gramas nas

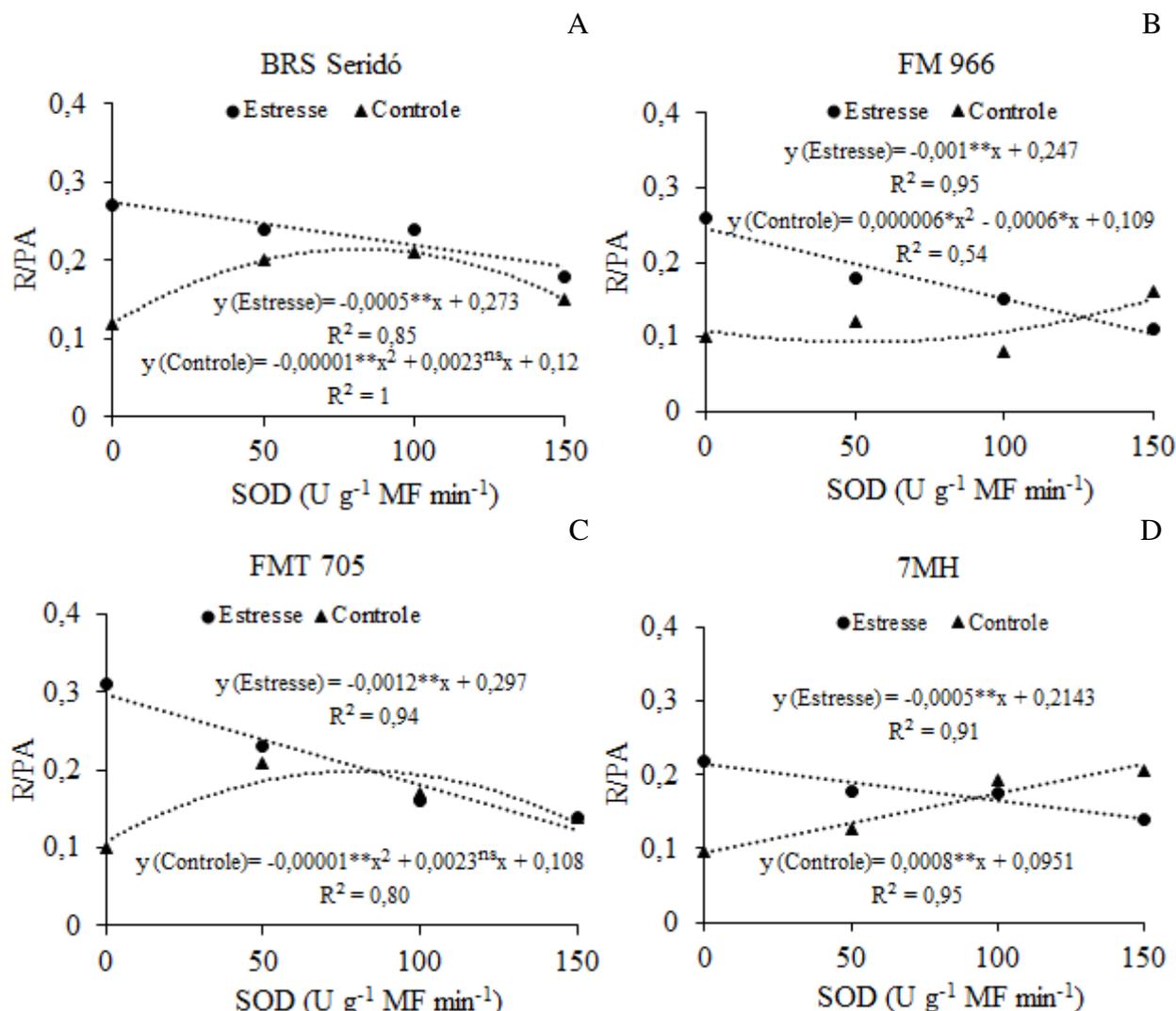
concentrações estimadas de 95 e 50  $\text{U g}^{-1} \text{MF min}^{-1}$  de SOD ( Figura 14B).



**Figura 14.** Massa seca de raiz (MSR) de plantas de algodoeiros correspondente a interação dupla DH x S (A) e G x S (B), aos 27 DAS.

Com fins de estimar um balanço geral do comportamento das cultivares frente a deficiência hídrica imposta e a aplicação exógena de SOD, estimou-se a relação massa seca de raiz/ massa seca parte área (R/PA) das plantas, que indica uma habilidade adicional em aprofundar suas raízes em busca de umidade para garantir sua sobrevivência. Conforme pode ser visualizado na (Figura 15), os quatros genótipos quando submetidos a deficiência hídrica reduziram a R/PA, à medida que aumentou as concentrações de SOD.

Quando do tratamento com SOD nas plantas sob irrigação plena (controle) os genótipos BRS Seridó e FMT 705 (Figura 15A e C), obtiveram equação de regressão do tipo quadrática, sendo a maior R/PA de 0,25 e 0,24 respectivamente, na concentração estimada de  $115 \text{ U g}^{-1} \text{MF min}^{-1}$  de SOD. No genótipo 7MH, observa-se crescimento linear com incremento de 122% quando comparado o tratamento sem SOD com o tratamento com SOD ( $150 \text{ U g}^{-1} \text{MF min}^{-1}$  de SOD) (Figura 15D).



**Figura 15** –Relação massa seca de raiz/ massa seca parte área (R/PA) de genótipos de algodoeiro (G) cultivados em duas condições de disponibilidade hídrica (DH) e aplicação foliar de SOD em diferentes concentrações, aos 27 DAS.

As raízes são os primeiros órgãos a perceberem os sinais celulares do estresse hídrico e o diferencial nas plantas tolerantes é a habilidade morfológica para expandir o sistema radicular em horizontes mais profundos do solo, permitindo às plantas maiores chances de sobrevivência em condições de seca (PACE et al., 1999; SALEH, 2012; RODRIGUES et al., 2016). A menor relação R/PA nos tratamentos de aumento da concentração de SOD é uma evidência que as plantas não precisaram investir massa nas raízes, o que é comum em plantas submetidas à deficiência hídrica. (RODRIGUES, 2016; PACE et al., 1999; YEATES, 2014). Neste trabalho, o aumento da aplicação de SOD teve efeito inverso, possivelmente devido à eficiência da enzima em dismutar as ERO's, o que deve ter resultado em condições mais propícias para as funções metabólicas em nível celular. Como exemplo do que é comum se

encontrar na literatura, PACE et al. (1999) submeteram dois genótipos de algodoeiro a 13 dias de supressão hídrica, iniciada aos 36 dias após a semeadura, e observaram que todas as plantas submetidas ao estresse reduziram altura, área foliar, massa seca de folhas e aumentaram a relação raiz/parte aérea.

## 6 CONCLUSÕES

- Em plantas de algodoeiro sob deficiência hídrica, mas sem aplicação de SOD, ocorre redução em diâmetro do caule, altura de planta, transpiração, taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> e acúmulo de massa da parte aérea e aumenta a massa seca de raiz e a relação raiz parte aérea.
- Em todos os genótipos estudados, a aplicação de 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de Superóxido Dismutase (SOD) aumenta a tolerância à deficiência hídrica.
- A aplicação de SOD é eficaz em aumentar a eficiência quântica do fotossistema II, em plantas de algodoeiro submetidas à deficiência hídrica, indicativo de melhor aproveitamento e conversão da energia luminosa.
- A aplicação de SOD contribui para maior produção de massa seca da parte aérea nos genótipos considerados menos tolerantes à seca (FMT 705 e FM 966), em proporção similar à dos genótipos tolerantes (BRS Seridó e CNPA 7MH).
- A relação R/PA diminui nos tratamentos com SOD.

## 7 RECOMENDAÇÕES

Pesquisas com aplicação exógena de SOD em algodoeiros devem testar doses maiores que 150 U g<sup>-1</sup> MF min<sup>-1</sup> de Superóxido Dismutase (SOD).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAPA - Associação brasileira de produtores de algodão. Números do algodão: o algodão no Brasil. Disponível em: <https://www.abrapa.com.br/Paginas/Dados/Algod%C3%A3o%20no%20Mundo.aspx>. Acesso em 18 de abril de 2021.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v.55, n.1, p.373-399, 2004.

ARRUDA, F. P.; ANDRADE, A. P.; SILVA, I. F.; PEREIRA, E. P.; GUIMARÃES, M. A. M. Emissão/Abscisão de estruturas reprodutivas do algodoeiro herbáceo, cv. CNPA 7H: efeito do estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.21-27, 2002.

BARBOSA, M. R.; SILVA, M. M. A.; WILLADINO, L.; ULISSES, C.; CAMARA, T. R. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciências Agrárias**, v.44, n.3, p.453-460, 2014.

BELTRÃO, N. E. M.; SOUZA, J. G. de. Fisiologia e ecofisiologia do algodoeiro. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Algodão: tecnologia de produção**. Dourados: EMBRAPA- CNPAO, p. 54-75. 2011.

BJÖRKMAN, O.; DEMMING, B. Photon yield of O<sub>2</sub> evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 k among vascular plants of diverse origins. **Planta**, Heidelberg, v. 170, n. 4, p.61-66, 1987.

BORÉM, A.; FREIRE, E. C. **Algodão: do plantio a colheita**. Minas Gerais: UFV, 2014. 312p.

BRITO, G. G.; SOFIATTI, V.; LIMA, M. M. A.; CARVALHO, L. P.; SILVA FILHO, J. L. Physiological traits for drought phenotyping in cotton. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.33, n.1, p.117-125, 2011.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of botany**, v.103, n.4, p.551-560, 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v.8, safra 2020/21, n.7, sétimo levantamento, 2021.

CORDÃO, M. A.; ARAÚJO, W. P.; PEREIRA, J. R.; ZONTA, J. H.; FERREIRA, F. N. Cultivares de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico aplicado em fases fenológicas. **Revista Verde**, v.13, n.3, p.313-321, 2018

DENAXA, N. K.; DAMVAKARIS, T.; ROUSSOS, P. A. Antioxidant defense system in young olive plants against drought stress and mitigation of adverse effects through external application of alleviating products. **Scientia Horticulturae**, v.259, p.108812, 2020.

DIAS, D. P.; MARENCO, R. A. Fotossíntese e fotoinibição em mogno e acariquara em função da luminosidade e temperatura foliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.3, p.305-311, 2007.

D`SOUZA, M. R. D; DEVARAJ, V. R. Biochemical responses of Hyacinth bean (*Lablab purpureus*) to salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, v.32, n.2, p.341-353, 2010.

ECHER, F. R.; OOSTERHUIS, D. M.; LOKA, D. A.; ROSOLEM, C. A. High night temperatures during the floral bud stage increase the abscission of reproductive structures in cotton. **Journal of agronomy and crop science**, v.200, n.3, p.191-198, 2014.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Algodão. Embrapa 113, algodão 7MH: cultivar derivada de híbrido de mocó x herbáceo, 1997. Disponível: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/276521/1/Folderembrapa1137MH0001.pdf>. Acessado em: 26/04/2021a.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **BRS Seridó: cultivar de ciclo semi-perene destinada à agricultura familiar no semi-árido do nordeste do Brasil**, 2006. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/276120/1/FolderBRSSerido.pdf>  
f. Acesso em 26/04/2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manejo da Irrigação do Algodoeiro**, 2016. Disponível <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1041572/manejo-da-irrigacao-do-algodoeiro>. Acesso em 22/04/2021.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Algodão. **BRS JADE: nova cultivar de algodão colorido de dupla aptidão para o Cerrado Baiano e para o Semiárido Nordeste**, 2017. Disponível: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/169961/1/BRS-Jade-nova-cultivar-de-algodao-colorido.pdf>. Acessado em: 22/08/2019.

FAROOQ M, WAHID A, KOBAYASHI N, FUJITA D, BASRA SMA (2009) Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. **Agron Sustain Dev** 29: 185-212. doi: <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v.37, n.4, p.529-535, 2019.

FOYER, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. **Environmental and experimental botany**, v.154, p.134-142, 2018.

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIM, V. Cultivo hidropônico de plantas. Campinas: **IAC**. 52p. 1999. (Boletim técnico, 180).

GADELHA, I. C. N.; FONSECA, N. B. S.; OLORIS, S. C. S.; MELO, M. M.; SOTO-BLANCO, B. Gossypol toxicity from cottonseed products. **The Scientific World Journal**, v.2014, p.1-11, 2014.

GECHEV, T. S.; BREUSEGEM, F. V. Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death. **BioEssays**, v.28, n.11, p. 1091–1101, 2006.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress

tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.48, n.12, p.909-930, 2010.

GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, n.6, p.481-494, 2005.

HALLIWELL, B. Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. **Plant physiology**, v.141, n.2, p.312-322, 2006.

HALLIWELL, B. and GUTTERIDGE, J. M. C. (1989). **Free Radicals in Biology and Medicine**. Oxford, Clarendon Press.

H. H. C.; SANTOS, R. C. Ecofisiologia do amendoim (*Arachis hypogaea* L.). In: SANTOS, R. C.; FREIRE, R. M. M.; LIMA, L. M. (Eds.), **O agronegócio do amendoim no Brasil**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2013, p.72-113.

INTERNATIONAL COTTON ADVISORY COMMITTEE. Cotton this month, [S.l.; s.n.], 2021. Disponível em: [https://icac.org/Content/PublicationsPdf%20Files/4b1e0c03\\_e012\\_4e94\\_abf2\\_e1afd5404b2d/cotton-this-month-e1\\_18.pdf.pdf](https://icac.org/Content/PublicationsPdf%20Files/4b1e0c03_e012_4e94_abf2_e1afd5404b2d/cotton-this-month-e1_18.pdf.pdf). Acesso em: 13 jan. 2021.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Fifth Assessment Report: Climate Change 2013. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. Press, 2013.

JAIMEZ, R. E; RADA, F; GARCÍA-NÚÑEZ, C; AZÓCAR, A. Seasonal variations in leaf gas exchange of platin cv. “Hartón” (*Musa AAB*) under different soil water conditions in a humid tropical region. **Scientia Horticulturae**, v.104, n.1, p.79-89, 2005.

KONRAD, M. L. F.; SILVA, J. A. B.; FURLANI, P. R.; MACHADO, E. C. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, v.64, n.3, p.339-347, 2005.

KRAUSE, G. H.; WEIS, E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. **Annual Review Plant Physiology. Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, n. 2, p.313-349, 1991.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2006.

LIMA, R. F.; ARAÚJO, W. P.; PEREIRA, J. R., CORDÃO, M. A., FERREIRA, F. N.; ZONTA, J. H. Fibras de algodoeiro herbáceo sob déficit hídrico. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.4, p.427-436, 2018.

LISAR, S. Y. S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M. M.; RAHMAN, I. M. M. Water stress in plants: causes, effects and responses. In RAHMAN, I. M. M, **Water Stress**, Rijeka: INTECH, 2012, p.1-14.

MACÊDO, É. C. F.; ZONTA, J. H.; MELO, YURI L.; MELO, A. S. Changes in osmoregulatory metabolism of cotton genotypes during water deficit and recovery period. **Agriambi**, v.23, n.8, p.607-613, 2019.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; e LANDELL, M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MAGALHÃES FILHO, J. R.; AMARAL, L. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C. Deficiência hídrica, trocas gasosas e crescimento de raízes em laranja 'valência' sobre dois tipos de porta-enxerto. **Bragantia**, v.67, n.1, p.75-82, 2008.

MELO, A. S.; SUASSUNA, J. F.; FERNANDES, P. D.; BRITO, M. E. B.; SUASSUNA, A. F.; AGUIAR NETTO, A. O. Crescimento vegetativo, resistência estomática, eficiência fotossintética e rendimento do fruto da melancia em diferentes níveis de água. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, n.1, p.73-79, 2010.

MELONI, D. A., OLIVA, M. A., RUIZ, H. A., MARTINEZ, C. A. Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, v.24, n.3, p.599-612, 2001.

MOUGET, J.; TREMBLIN, G. Suitability of the fluorescence monitoring system (FM, Hansatech) for measurement of photosynthetic characteristics in algae. **Aquatic Botany**, Amsterdam, v. 74, n. 3, p.219-231, 2002.

NEMALI, K.; STEPHENS, M. Plant abiotic stress: water. **Encyclopedia of Agriculture and Food Systems**, v.4, p.335-342, 2014.

NOCTOR, G.; MHAMDI, A.; FOYER, C. H. The Roles of Reactive Oxygen Metabolism in Drought: Not So Cut and Dried. **Plant Physiology**, v.164, n.4, p.1636-1648, 2014.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; TÁVORA, F. J. A. F.; ALBUQUERQUE, M. B.; NASCIMENTO, PACE, P. F.; CRALLE, H. T.; EL-HALAWANY, S. H. M.; COTHREN, J. T.; SENSEMAN, S. A. Drought-induced changes in shoot and root growth of young cotton plants. **The Journal of Cotton Science**. v.3, p.183-187, 1999.

PAIXÃO, A. P.; JÚNIOR, E. F.; HIRAKI, S. S.; MACHADO, L. H. M. D.; CAMARGOS, L. S. DE; CARVALHO, F. T. DE. Crescimento, fotossíntese e atividade enzimática de genótipos de algodoeiro herbáceo submetidos ao cloreto de mepiquat. **Cultura Agronômica**. v.26, n.4, p.540-553, 2017.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Saafey*, v. 60, n. 03, p. 324-349, 2005. In SILVA, et al, Acúmulo de íons e crescimento de pinhão-manso sob diferentes níveis de salinidade. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.2, p.240-246, 2009.

PILON, M.; RAVET, K.; TAPKEN, W. The biogenesis and physiological function of chloroplast superoxide dismutases. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v.1807, n.8, p.989-998, 2011.

POSADA, F. C.; OLMOS, J. E. P.; ULRICHS, C. Crecimiento y eficiencia fotoquímica del fotosistema II en plantas de fresa (*Fragaria* sp.) afectadas por la calidad de la luz: Implicaciones agronómicas. **Revista U. D. C. A Actualidad & Divulgación Científica**, v.14, n.2, p.43-53, 2011.

RITCHIE, G. L.; BEDNARZ, C. W.; JOST, P. H.; BROWN, S. M. **Cotton Growth and Development**. Georgia: The University of Georgia - Cooperative Extension. 2007. 16p.

RODRIGUES, J. D.; SILVA, C. R. C.; PEREIRA, R. F.; RAMOS, J. P. C.; MELO FILHO, P. A.; CAVALCANTI, J. J. V.; SANTOS, R. C. Characterization of water-stress tolerant cotton cultivars based on plant growth and in activity of antioxidant enzymes. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, p.3763-3770, 2016.

ROSOLEM, C. A.; DEUS, A. C. F.; MARTINS, P. O.; LÉLES, E. P. Acúmulo e distribuição de boro em cultivares de algodão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1231-1238, 2012.

SÁ, F. V. S.; BRITO, M. E. B.; SILVA, L. A.; MOREIRA, R. C. L.; FERNANDES, P. D.; FIGUEIREDO, L. C. Fisiologia da percepção do estresse salino em híbridos de tangerineira - Sunki Comum sob solução hidropônica salinizada. **Comunicata Scientiae**, v.6, n.4, p.463-470, 2015.

SAIBI, W.; BRINI, F. Superoxide dismutase (SOD) and abiotic stress tolerance in plants: an overview. In: AHMAD, Parvaiz. *Oxidative Damage to Plants*, **SP College, Srinagara, Jammu e Kashmir**, Índia: Elsevier, 2014. p.101 -141.

SALEH, B. Salt stress alters physiological indicators in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Soil & environment**, v.31, p.113-118, 2012.

SCANDALIOS, J. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses. **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v.38, n.7, p.995–1014, 2005.

SECRETARIA DE AGRICULTURA, IRRIGAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA DO ESTADO DA BAHIA - SEAGRI. **Cultura**: algodão. Salvador: Editora Revista Bahia Agrícola, 2006. Disponível em: <http://www.seagri.ba.gov.br/Algodao.htm>. Acesso em: 12 jan. 2019.

SEKMEN, A. H.; OZGUR, R.; UZILDAY, B.; TURKAN, I. Reactive oxygen species scavenging capacities of cotton (*Gossypium hirsutum*) cultivars under combined drought and heat induced oxidative stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.99, p.141-149, 2014.

SHIMAZAKI, K. I.; DOI, M.; ASSMANN, S. M.; KINOSHITA, T. Light regulation of stomatal movement. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v.58, p.219-247, 2007.

SILVA, L. A. S.; BRITO, M. E. B.; SÁ, F. V. S.; MOREIRA, R. C. L. M.; SOARES FILHO, W. S.; FERNANDES, P. D. Mecanismos fisiológicos em híbridos de citros sob estresse salino em cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.Especial, p.S1-S7, 2014.

SILVA, M. M. P. da; VASQUEZ, H. M.; BRESSAN-SMITH, R.; J. F. C.; ERBESDOBLER, E. D.; ANDRADE JÚNIOR, P. S. C. Eficiência Fotoquímica de gramíneas forrageiras tropicais submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.1, p.67-74, 2006.

SOUZA, A. A.; FREIRE, E. C.; BRUNO, R. L. A.; CARVALHO, L. P.; SILVA FILHO, J. L.; PEREIRA, W. E. Estabilidade e adaptabilidade do algodoeiro herbáceo no cerrado do Mato grosso e Mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1125-1131, 2006.

STORK, L.; GARCIA, D. C.; LOPES, S. J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação Vegetal**. 3ª ed. Santa Maria: Ed. UFSM, 2011. 200p.

SUASSUNA, J. F.; MELO, A. S. de; COSTA, F. S.; FERNANDES, P. D.; FERREIRA, R. de S.; SOUZA, M. S. da S. Eficiência fotoquímica e produtividade de frutos de meloeiro cultivado sob diferentes lâminas de irrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, v.32, n.4, p.1251-1262, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p.858.

TORRES NETTO, A.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, G. J. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v.104, n.2, p.199- 209, 2005.

VISON, C.C.; MOTA, A.P.Z.; OLIVEIRA, T.N.; GUIMARAES, L.A.; LEAL-BERTIOLI; S.C.M.; WILLIAMS T.C.R. NEPOMUCENO, A.L.; SARAIVA, M.A.P; ARAUJO, A.C.G.; GUIMARAES, P.M.; BRASILEIRO A.C.M. Early responses to dehydration in contrasting wild *Arachis* species. **PLoS One**, v.13, n.5, p.e0198191, 2018.

YEATES, S. J. Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro. In: ECHER, F. R. (Ed.). **O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e nutrientes**. Cuiabá, MT: Instituto Mato-Grossense do Algodão, p.63–77, 2014.

YI, X. P.; ZHANG, Y. L.; YAO, H. S.; LUO, H. H.; GOU, L.; CHOW, W. S.; ZHANG, W. F. Rapid recovery of photosynthetic rate following soil water deficit and re-watering in cotton plants (*Gossypium herbaceum* L.) is related to the stability of the photosystems. **Journal of Plant Physiology**, v.194, p.23-34, 2016.

WU, SONGWEI; HU, CHENGXIAO; TAN, QILING; LI, LU; SHI, KAILI; ZHENG, YONG. Drought stress tolerance mediated by zinc-induced antioxidative defense and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum*). *Acta Physiol Plant.*, v. 37, p.1-9, 2015.