



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I**

**PRÓ-REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

GILIARD BRUNO PRIMO DE LIMA

**RIZOBACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E MITIGAÇÃO DA
RESTRIÇÃO HÍDRICA EM GERGELIM**

**CAMPINA GRANDE-PB
2021**

GILIARD BRUNO PRIMO DE LIMA

**RIZOBACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E MITIGAÇÃO DA
RESTRIÇÃO HÍDRICA EM GERGELIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de Concentração: Biotecnologia e Melhoramento Vegetal.

Orientadora: Prof^a. Dra. Liziane Maria de Lima

**CAMPINA GRANDE-PB
2021**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

L732r Lima, Giliard Bruno Primo de.
Rizobactérias promotoras de crescimento e mitigação da restrição hídrica em gergelim [manuscrito] / Giliard Bruno Primo de Lima. - 2021.
67 p. : il. colorido.

Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2021.
"Orientação : Profa. Dra. Liziane Maria de Lima, Coordenação de Curso de Biologia - CCBS."

1. Sesamum indicum L. 2. Bactérias diazotróficas. 3. Estresse hídrico. I. Título

21. ed. CDD 583.95

GILIARD BRUNO PRIMO DE LIMA

RIZOBACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO E MITIGAÇÃO DA
RESTRIÇÃO HÍDRICA EM GERGELIM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de Concentração: Biotecnologia e Melhoramento Vegetal.

Aprovada em: 09/09/2021.

BANCA EXAMINADORA

Geisenilma Maria Gonçalves da Rocha

Prof^ª. Dra. Geisenilma Maria Gonçalves da Rocha
UNIÃO DAS INSTITUIÇÕES EDUCACIONAIS DE SÃO PAULO (UNIESP)

Nair Helena Castro Arriel

Prof^ª. Dra. Nair Helena Castro Arriel
EMBRAPA ALGODÃO

Liziane

Prof^ª. Dra. Liziane Maria de Lima (Orientadora)
EMBRAPA ALGODÃO

Àquele que merece todo o amor do mundo e a gratidão eterna do nosso coração, dedico.

AGRADECIMENTOS

Louvo e agradeço a Deus pela dádiva da vida que me proporcionou plantar no ontem e colher no HOJE; pelo cuidado, carinho e em especial a Sua Divina Providência que nunca me deixou faltar nada. Gratidão!

À minha família que sempre foi e será meu porto seguro, lugar de descanso, crescimento e amadurecimento.

À minha namorada que esteve comigo me apoiando em todos os momentos.

Aos meus irmãos na fé da Obra e da Comunidade Católica Shalom, obrigado pelas orações e escuta. Ozziney e Elizandra valeu pela ajuda na contagem das sementes!!!

Ao meu amigo Marcondes (*in memoriam*) que teve sua vida ceifada antes de ver essa conquista.

Aos meus amigos caminhoneiros, Josa e Sandro, obrigado pelas caronas das madrugadas.

À minha orientadora Dra. Liziane Maria de Lima por ter acreditado em mim, por todas as contribuições, paciência, compreensão e compromisso. A senhora é parte dessa vitória e das conquistas futuras que o conhecimento irá me proporcionar!

Ao Dr. Paulo Ivan da Embrapa Semiárido e a empresa Geoclean pelas estirpes cedidas para o estudo e por todas as orientações.

À Dra. Nair Helena Castro Arriel por ser minha mentora, prestativa e atenciosa em toda condução desse trabalho. Gratidão por tudo o que senhora fez por mim!

Ao Dr. Tarcísio Gondim e Adelardo por todas as contribuições na aérea do campo.

A Luana e Lázaro, Juliana e Gledson pela acolhida em suas casas, amizade e partilha, muito obrigado!

Aos amigos que conquistei na turma do mestrado: Edson (que esteve presente em todo processo), Luana, Tybério (um “irmão mais velho” que essa turma me concedeu), Cristiano, Pequena, Ruth, Igor (parceiro desde a graduação), Dayse e Alexandre.

Aos meus amigos do laboratório que tanto me ajudaram: Terê, Fábria, Fátima, Aline, Carminha, Dione, Laysla... e em especial Erika e Dra. Geisenilma Rocha que não mediram esforços ultrapassando até os limites físicos para ver os frutos desse trabalho.

Aos amigos Di Assis e Mirandy por todas as contribuições na estatística, na casa de vegetação, paciência e amizade, gratidão por tudo.

A UEPB/EMBRAPA minha segunda casa, ao programa PPGCA, a Capes pela concessão da bolsa.

O nosso tempo, quando doamos nossa presença, é o bem mais precioso que podemos oferecer ao outro, a todos os que fizeram parte deste processo, que investiram seu tempo, minha mais sincera GRATIDÃO.

RESUMO

O uso de microrganismos para mitigar os efeitos negativos da seca tem sido investigado em algumas espécies vegetais. Para o gergelim (*Sesamum indicum* L.), uma espécie oleaginosa e que apresenta boa plasticidade fenotípica, seu cultivo tem se expandido como cultura de safrinha na região do Cerrado e Semiárido brasileiro, é importante que estudos sejam conduzidos para avaliar seu desempenho em condições de pouca ou irregular distribuição pluvial, pois o estresse hídrico é uma problemática que gera perdas eminentes para pequenos e médios produtores, principalmente na região Nordeste ou mesmo em condições de cultivo de segunda safra, pós cultivo da soja ou algodão. Este trabalho objetivou investigar a interação de inoculantes a base de bacilos com genótipos de gergelim, sob déficit hídrico. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Algodão (Campina Grande, PB) com dois genótipos de gergelim (BRS Seda e BRS Anahi) e quatro inoculantes (*Bacillus subtilis* pant001, ESA 13, ESA 402 e M143) em vasos com capacidade para 20 L, preenchidos com solo textura franca, previamente analisado no Laboratório de Solos da Embrapa Algodão. O pH e a fertilidade foram ajustados de acordo com as recomendações da análise do solo. O delineamento foi inteiramente casualizado com cinco repetições e seis tratamentos: (i) sem nitrogênio (testemunha absoluta); (ii) com nitrogênio (sulfato de amônio kg ha⁻¹); (iii) quatro inoculantes a base de bacilos; com e sem estresse hídrico. A partir do 30º dia após a emergência a rega foi suspensa por oito dias e as plantas submetidas a análises dos parâmetros fisiológicos: condutância estomática (*gs*); fotossíntese (*A*); transpiração (*E*) e concentração interna de CO₂ (*Ci*), utilizando o analisador de gás infravermelho (IRGA); a partir dos dados obtidos foram calculadas a eficiência instantânea da carboxilação (*EiC*) e a eficiência do uso da água (*EUA*). No último dia de estresse hídrico coletou-se folhas para as análises bioquímicas (superóxido dismutase, catalase, ascorbato peroxidase, teor de prolina livre, teor de nitrogênio, teores de clorofila a, b e total (a+b) e de carotenoides). Ao final do experimento foram analisados os parâmetros agrônômicos: altura de planta; diâmetro do caule; número de cápsulas por planta; massa seca da parte aérea e de raízes; e peso de mil sementes. Os dados foram analisados no programa estatístico SISVAR versão 5.6, submetidos à análise de variância e a comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Os resultados revelaram efeito positivo dos inoculantes para todas as variáveis agrônômicas e fisiológicas. A análise de nitrogênio em folha mostrou maior acúmulo nos tratamentos estressados, com diferença significativa entre os tratamentos com e sem inoculação. A mensuração bioquímica mostrou um efeito significativo para prolina, superóxido dismutase, ascorbato peroxidase, catalase e pigmentos fotossintéticos. Considerando a produção final, a estirpe ESA 13 estabeleceu uma melhor interação com o genótipo BRS Anahi e a estirpe ESA 402 com o genótipo BRS Seda, com incremento de 49% e 34%, respectivamente, para o peso de mil sementes, quando comparado ao tratamento com nitrogênio, em condições de estresse hídrico. Mediante estes dados identifica-se um potencial efeito sinérgico dos inoculantes às plantas de gergelim, implicando em ação benéfica e bio-sustentável a partir de uma cadeia produtiva com crescente potencial no mercado mundial pela sua qualidade nutricional.

Palavras Chave: *Sesamum indicum* L. Bactérias diazotróficas. Estresse hídrico.

ABSTRACT

The use of microorganisms to mitigate the negative effects of drought has been investigated in some plant species. For sesame (*Sesamum indicum* L.), an oleaginous species with good phenotypic plasticity, its cultivation has expanded as an off-season crop in the Cerrado and Semiarid regions of Brazil, it is important that studies be conducted to evaluate its performance under little or irregular rainfall distribution, as water stress is a problem that generates imminent losses for small and medium producers, especially in the Northeast region or even in conditions of second crop cultivation, after soy or cotton cultivation. This work aimed to investigate the interaction of bacilli-based inoculants with sesame genotypes under water deficit. The experiment was conducted in a greenhouse at Embrapa Algodão (Campina Grande, PB) with two sesame genotypes (BRS Seda and BRS Anahi) and four inoculants (*Bacillus subtilis* pant001, ESA 13, ESA 402, and M143) in pots with capacity for 20 L, filled with free-textured soil, previously analyzed at the Soil Laboratory of Embrapa Algodão. The pH and fertility were adjusted according to soil analysis recommendations. The design was completely randomized with five replications and six treatments: (i) without nitrogen (absolute control); (ii) with nitrogen (ammonium sulfate kg ha⁻¹); (iii) four bacilli-based inoculants; with and without water stress. From the 30th day after emergence, watering was suspended for eight days and the plants were subjected to analysis of physiological parameters: stomatal conductance (gs); photosynthesis (A); transpiration (E) and internal CO₂ concentration (Ci), using the infrared gas analyzer (IRGA); From the data obtained, the instantaneous efficiency of carboxylation (EiC) and the efficiency of water use (EWA) were calculated. On the last day of water stress, leaves were collected for biochemical analysis [superoxide dismutase, catalase, ascorbate peroxidase, free proline content, nitrogen content, chlorophyll a, b and total (a+b) and carotenoid content]. At the end of the experiment, the agronomic parameters were analyzed: plant height; stem diameter; number of capsules per plant; shoot and root dry mass; and weight of a thousand seeds. Data were analyzed using the SISVAR version 5.7 statistical program, subjected to analysis of variance and comparison of means by the Tukey test (p≤0.05) and submitted to the Shapiro-Wilk normality test. The results revealed a positive effect of inoculants for all agronomic and physiological variables. Leaf nitrogen analysis showed greater accumulation in the stressed treatments, with a significant difference between treatments with and without inoculation. Biochemical measurement showed a significant effect for proline, superoxide demutase, ascorbate peroxidase, catalase and photosynthetic pigments. Considering the final production, the ESA 13 strain established a better interaction with the BRS Anahi genotype and the ESA 402 strain with the BRS Seda genotype, with an increase of 49% and 34%, respectively, for the weight of a thousand seeds, when compared to nitrogen treatment under water stress conditions. Through these data, a potential synergistic effect of the inoculants to the sesame plants is identified, implying a beneficial and bio-sustainable action from a productive chain with growing potential in the world market due to its nutritional quality.

Keywords: *Sesamum indicum* L. Diazotrophic bacteria. Water stress.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** - Espécies reativas de oxigênio, dano oxidativo e mecanismo de defesa antioxidante em plantas sob condições estressantes. (Fonte adaptada de Sharma et al. 2012).....24
- Figura 2** - Variáveis agronômicas: **Altura (ALT); **Diâmetro do caule (DC); **Massa seca da parte aérea (MSPA); *Massa seca da raiz (MSR), submetidos a nível de significância **1 e *5% pelo teste F de dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos, sob restrição hídrica. Testemunha absoluta (TABS). Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; letras gregas comparam os genótipos.....34
- Figura 3** - Número de cápsulas por planta (NCP) com interação tripla GEN x RH x Trat, $p \leq 0,01$ (2A) e massa de mil sementes (MMS) (2B) de dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos, sob restrição hídrica. Testemunha absoluta (TABS). Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; letras gregas comparam os genótipos.....36
- Figura 4** - Interação dupla entre regime hídrico e tratamentos com diferentes inoculantes a base de bacilos, com significância a $p \leq 0,05$ para a MMS de dois genótipos de gergelim, sob restrição hídrica.....38
- Figura 5** - Acúmulo de nitrogênio em folhas de dois genótipos de gergelim inoculadas com bacilos, sob restrição hídrica, a partir da proteína bruta ($p \leq 0,05$). Testemunha absoluta (TABS). Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; as maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; as letras gregas comparam os genótipos.....39
- Figura 6** - Análise da interação tripla para as variáveis Carbono interno (*C_i*) (6A), eficiência do uso da água (*EUA*) (6B) e transpiração (*E*) (6C) no oitavo dia de restrição hídrica para dois genótipos de gergelim inoculadas com bacilos, sob restrição hídrica.....41

Figura 7 - Relação da A/C_i (E_iC) mostrando a interação dupla entre regime hídrico e tratamentos, com nível de significância a $p < 0,05$. Letras minúsculas comparam os regimes hídricos e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.....	42
Figura 8 - Interações mostrando o comportamento entre os genótipos, regime hídrico e tratamentos com nível de significância a $p < 0,01$. Letras gregas (8A) comparam os genótipos nos respectivos regimes hídricos; letras maiúsculas (8B) comparam o comportamento dos tratamentos dentro de cada genótipo; e letras minúsculas (8C) comparam o regime hídrico dentro de cada tratamento.....	43
Figura 9 - Interações mostrando o comportamento entre GEN x RH ($p < 0,05$) e RH x TRAT ($p < 0,01$) para a variável da condutância estomática (G_s).....	44
Figura 10 - Comportamento fisiológico dos genótipos BRS Anahi e BRS Seda, inoculadas com estirpes de bacilos e submetidas a estresse hídrico, 6º dia após reidratação a. Letras gregas comparam os genótipos nos respectivos regimes hídricos; letras maiúsculas comparam o comportamento dos tratamentos dentro de cada genótipo; e letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada tratamento.....	48
Figura 11 - Concentração de prolina livre em dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos e submetidos a estresse hídrico comparando-se ao controle, com seus respectivos tratamentos significativos a $p \leq 0,01$	49
Figura 12 - Concentração da superóxido dismutase (SOD) em função do déficit hídrico comparando a interação dos genótipos de gergelim tratadas com inoculantes a base de bacilos.....	50
Figura 13 - Concentração da ascorbato peroxidase (APX) em função do déficit hídrico, comparando a interação dos genótipos de gergelim tratadas com inoculantes a base de bacilos.....	51
Figura 14 - Concentração da catalase (CAT) em função do déficit hídrico comparando a interação dos genótipos de gergelim tratadas com inoculantes a base de bacilos.....	53

Figura 15 - Análise de pigmentos fotossintéticos clorofila *a* (14A), *b* (14B), carotenoide (14C) e clorofila total (14D) em plantas de gergelim inoculadas com bacilos e sob condição de déficit hídrico.....54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características morfoagronômicas dos genótipos de gergelim BRS Anahi e BRS Seda, Embrapa Algodão, Campina Grande, PB. (Fonte: Tabela adaptada da Embrapa-CNPQ, 2007-2015 https://ainfo.cnptia.embrapa.br).....	26
Tabela 2 - Análise dos componentes físico-químicos do solo (Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas. Embrapa Algodão, Campina Grande, PB, 2020)	27
Tabela 3 - Resumo do quadrado da massa de mil sementes (MMS) e do número de cápsulas por planta (NCP), de dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos, sob restrição hídrica.....	37
Tabela 4 - Resumo da análise de variância para concentração interna de carbono (C_i) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), condutância estomática (G_s) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), fotossíntese (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) a partir da relação (E/C_i), eficiência do uso da água (EUA) relação entre (A/E).....	40
Tabela 5 - Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (F_o), fluorescência variável (F_v), fluorescência média (F_m) e a relação da eficiência quântica potencial entre F_v/F_m	45
Tabela 6 - Resumo da análise de variância para concentração interna de carbono (C_i) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), condutância estomática (G_s) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), fotossíntese (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) a partir da relação (E/C_i), eficiência do uso da água (EUA) relação entre (A/E) no período de reidratação (48h).....	46
Tabela 7 - Resumo do comportamento das principais variáveis fisiológicas e bioquímicas analisadas na interação entre os dois genótipos de gergelim e os inoculantes a base de bacilos submetidos a restrição hídrica e comparados ao controle testados a $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1. Geral	15
2.2. Específicos.....	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1. Rizobactérias promotoras de crescimento vegetal.....	16
3.2. Características gerais do <i>Bacillus subtilis</i>	17
3.3. Aspectos morfológicos da cultura do gergelim	18
3.4. O gergelim e sua importância econômica	19
3.5. Condições de cultivo.....	20
3.6. Comportamento fisiológico do gergelim sob déficit hídrico	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1. Implantação, condução e coleta do experimento em casa de vegetação.....	26
4.2. Cultivo das bactérias e preparo dos inoculantes	27
4.3. Variáveis agronômicas.....	28
4.4. Trocas gasosas	28
4.5. Análise de nitrogênio	29
4.6. Atividades enzimáticas	29
4.7. Teor de Prolina livre total.....	30
4.8. Análises estatísticas	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1. Variáveis agronômicas	32
5.2. Análise de nitrogênio nas folhas	38
5.3. Variáveis fisiológicas	39
5.3.1. Plantas de gergelim com 8 dias de estresse hídrico	39
5.3.2. Plantas de gergelim após a reidratação	45

5.4. Variáveis bioquímicas	49
5.4.1. Prolina livre e total	49
5.4.2. Atividade Superóxido dismutase (SOD)	50
5.4.3. Atividade Ascorbato Peroxidase (APX)	51
5.4.4. Atividade Catalase (CAT)	52
5.4.5. Pigmentos fotossintéticos	53
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço do conhecimento, muitas tecnologias estão surgindo ou sendo adaptadas com intuito de promover o aumento na produtividade das culturas, especialmente na região Nordeste, tendo em vista as condições climáticas limitantes. Neste aspecto, os biofertilizantes assumem uma alternativa viável e biosustentável com relação a inoculação de microrganismos que atuam como promotores de crescimento e na defesa contra patógenos e doenças de plantas, por meio de interações mutualistas em suas raízes e folhas (HAQUE et al., 2020). As bactérias que são capazes de colonizar as raízes e promover o crescimento das plantas são conhecidas como rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RPCP). Este processo mutualista ocorre de forma concomitante entre plantas e microrganismos não patogênicos.

Uma vez estabelecida a associação, é possível supor que as rizobactérias podem atenuar inúmeros efeitos deletérios advindos de fatores bióticos e abióticos, além de aumentar a produtividade de plantações agrícolas. O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma cultura agrícola em plena ascensão comercial, espécie originária da África, oleaginosa, apresenta sementes com óleo de excelente qualidade, com antioxidantes advindos da presença de sesamol, sesamolina e sesamina (FERREIRA, e SPRICIGO, 2017). É utilizado na produção de diversos alimentos, na indústria, área médica, farmacêutica, *in natura* e na alimentação animal. O gergelim é uma cultura de fácil cultivo e tolerante a certos períodos de estiagem, o que o torna uma alternativa ideal para pequenos e médios produtores rurais do Nordeste (BELTRÃO e OLIVEIRA, 2011).

As condições de tolerância a determinados períodos de estiagem são acrescidas pela boa plasticidade fenotípica que as plantas de gergelim apresentam, portanto, essa característica permite uma maior versatilidade diante de condições impostas por fatores estressantes, possibilitando um ajustamento nas características fenotípicas – número de ramos e cápsulas, tricomas - diante das limitações o que pode aumentar as chances de sobrevivência e produtividade da cultura. Plasticidade fenotípica é a capacidade que alguns organismos desenvolvem e aplicam na morfologia, fisiologia ou anatomia produzindo respostas a diferentes estímulos bióticos e abióticos (VALERIO, 2020).

Apesar de ser considerado tolerante ao déficit hídrico o gergelim requer precipitações pluviométricas bem distribuídas para atingir seu potencial máximo produtivo. No entanto, essa condição associada ao uso de biofertilizantes naturais e reguladores de crescimento pode favorecer a produtividade do gergelim, especialmente no que tange a produção de sementes (GHOSH, 2000).

As RPCP podem ser encontradas associadas às todas as estruturas principais (folhas, flores, frutos, caules e raízes) de diferentes plantas (BERG et al., 2016), atuando como bioestimulantes e biopesticidas em várias culturas de relevância econômica, promovendo o crescimento vegetal por meio

de mecanismos como a estimulação da produção de hormônios vegetais, fixação biológica de nitrogênio, sideróforos, produção de antibióticos, resistência sistêmica induzida, dentre outros mecanismos (BACKER et al., 2018). Podem ainda ser utilizadas como fertilizante organomineral, fixando nutrientes essenciais como nitrogênio e solubilizando fosfato (LUCY et al., 2004), são dotadas da capacidade de induzir a síntese de fitohormônios (GLICK, 1995), enzimas hidrolíticas e antibióticos (SENTHILKUMAR et al., 2009) e atenuar o estresse por déficit hídrico e salino (SANDHYA et al., 2011; LIMA et al., 2011; BARBOSA et al., 2018; BRITO et al., 2019). Estas últimas condições, solos secos e salinos, são características comuns na região Nordeste e cerrado que afetam as culturas agrícolas, contudo, vem surgindo estratégias que podem ser utilizadas para mitigar os efeitos da seca sobre as plantas, como a aplicação de inoculantes.

Desta forma, o uso de inoculantes a base de bacilos sobre dois genótipos de gergelim (BRS Seda e BRS Anahi) , pode favorecer o crescimento das plantas sob condições de estresse, atuando de maneira positiva sobre os aspectos fisiológicos, agronômicos e bioquímicos, resultando em respostas que podem beneficiar pequenos e médios produtores no cultivo do gergelim em condições de sequeiro. Essa vantagem de tolerância a estiagem com uso de inoculantes, faz do o gergelim uma cultura idela para a safrinha, como opção de cultura secundária, aumentando a renda dos produtores.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Avaliar a interação dos inoculantes com dois genótipos de gergelim sob condições de déficit hídrico, por meio de análises agronômicas, fisiológicas e bioquímicas, a fim de selecionar os genótipos inoculados mais responsivos ao estresse.

2.2 Específicos

- Avaliar alterações fisiológicas e bioquímicas provocadas pelo déficit hídrico nos genótipos de gergelim inoculados.
- Estimar os componentes agronômicos dos genótipos de gergelim inoculados, a fim de identificar o genótipo mais responsivo em condições de déficit hídrico.
- Identificar a interação genótipo x inoculante mais responsivo sob condição de déficit hídrico.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Rizobactérias promotoras do crescimento vegetal

As plantas exercem um controle sobre o ecossistema da microbiota do solo, a produção de exsudatos radiculares que fornecem substrato para o crescimento de diversos microrganismos e a quimiotaxia atuando como sinalização para recrutamento de espécies específicas em que regulam suas atividades genéticas e bioquímicas (ZHANG et al., 2017; SMITH et al., 2017). Visando os benefícios pré-estabelecidos dos microrganismos para com as plantas, novos meios tecnológicos conduzidos por pesquisas biotecnológicas vêm se tornando alternativos para a minimização do uso exacerbado de fertilizantes químicos, como os inoculantes a base de bactérias.

Um grupo amplamente definido como rizobactérias promotoras do crescimento vegetal (PGPR, *plant growth promoting rhizobacteria*) fornece vários benefícios para plantas em crescimento, a exemplo das bactérias do gênero *Bacillus* sp. que favorece a liberação e absorção de nutrientes, como o ferro necessário às clorofilas, conseqüentemente induzem uma maior eficiência fotossintética, crescimento vegetativo e desenvolvimento das raízes (TAIZ e ZEIGER, 2017).

As rizobactérias não patogênicas além de auxiliar no crescimento das plantas, promovem a solubilização e absorção de nutrientes, estimulam a síntese de fitohormônios, ainda podem suprimir patógenos a partir da produção de antibióticos e sideróforos (KUSS et al., 2007), estabelecendo uma simbiose benéfica para seus hospedeiros.

Segundo Oldroyd e Dixon (2014), constantes pesquisas são conduzidas por sistemas que introduzem os organismos simbiotes nas culturas, o que pode contribuir para a substituição ou complementação dos fertilizantes químicos. Os autores afirmam que inoculantes são produtos, que podem ser considerados biofertilizantes, com altas concentrações de microrganismos atuantes de maneira favorável no desenvolvimento e crescimento das plantas, aumentando a produtividade da cultura, preservação da microflora e microfauna do solo, redução de custos na produção, sem danos para os recursos hídricos nem emissão de poluentes e atuam na biorremediação do solo.

Nessa perspectiva, os efeitos dos inoculantes já são observados em diversas culturas como os estudos realizados por Paula et al. (2021) que mostraram melhoria no desenvolvimento do milho, maior que 80%, com tratamentos inoculados; como complemento para a adubação nitrogenada (MORENO et al., 2021); em amendoim na atenuação dos efeitos deletérios do déficit hídrico (BARBOSA et al., 2018; BRITO et al., 2019); e também em gergelim, por inoculação com *Bacillus* sp. para testar a eficiência simbiótica da planta com os bacilos nativos do solo em vista da melhoria no crescimento da planta e no teor de óleo (NITHYAPRIYA et al., 2021).

Estudos visando o crescimento e a produtividade de genótipos de gergelim foram conduzidos em função de adubação orgânica e mineral, os achados remeteram uma maior eficiência de produtividade na biofertilização com esterco caprino um biofertilizante orgânico (NETO et al., 2016). Contudo, para a cultura do gergelim ainda são escassos os estudos envolvendo o comportamento do gergelim e os biofertilizantes.

Estudos conduzidos por Sierra et al. (2020) visando o sequenciamento genômico de *Bacillus*, revelaram um potencial na ação para mecanismos de promoção do crescimento vegetal e possível avanço no desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável. Os autores afirmaram que os genes sequenciados estão envolvidos na produção de sideróforos, lipopeptídeos (surfactina e fengicina), compostos voláteis, fitase e bacilibactina.

Os resultados encontrados pelos autores utilizando uma cepa de *B. subtilis* (EA-CB0575) como biofertilizante em tomateiro, indicaram um aumento de 34,60% no peso seco total das plantas em relação as plantas não inoculadas. Esses resultados sugerem que a identificação de genes específicos de cepas de *Bacillus* podem explicar o efeito potencial das rizobactérias para promoção de crescimento em plantas, consequentemente incentivar o desenvolvimento de biofertilizantes vegetais para uma agricultura mais sustentável (SIERRA et al., 2020).

Os benefícios produzidos pela interação das rizobactérias em associação simbiótica com as plantas, norteiam a importância da utilização desses microrganismos como biofertilizantes na agricultura. O estresse hídrico é limitante para as relações hídricas a nível celular ou para o organismo completo das plantas ocasionando perdas econômicas na agricultura (MARULANDA et al., 2007).

De acordo com Hashem et al. (2019) as rizobactérias podem produzir compostos que atuam como mediadores de estresse abiótico em plantas, dentre eles estão a biofertilização com liberação de nutrientes solubilizados como o fósforo ou fixados biologicamente como o nitrogênio, estimulação do crescimento da raiz pela biossíntese de hormônios como a auxina, biorremediação e atenuação do estresse.

3.2 Características gerais do *Bacillus subtilis*

O *B. subtilis* é uma bactéria gram-positiva, esporulante em condições adversas como carência nutricional, dessecação e temperaturas inibidoras ao crescimento (MADIGAN, 2016), não patogênica, comumente encontrada no solo e na vegetação (STEIN, 2005). É considerado aeróbico facultativo, podendo crescer anaerobicamente na presença de nitratos, também é benéfico para plantas, sendo amplamente utilizado como biofertilizante (PASCALE et al., 2013). O *B. subtilis* é um agente bastante eficaz no biocontrole de microrganismos fitopatógenos como alguns fungos (BETTIOL & KIMATI,

1990), controle biológico de nematoides, devido a produção de endotoxinas que interferem no seu ciclo reprodutivo (ARAÚJO et al., 2012; FERNANDES et al., 2013), pela produção de enzimas hidrolíticas como glucanases ou proteases, lipopeptídeos antibióticos surfactina, fungicina e/ou iturina (CAZORLA et al., 2007), e ainda pode ser utilizado como atenuante para plantas sob estresse hídrico, portanto, a inoculação de plantas com microrganismos benéficos, como *B. subtilis*, promove o crescimento das plantas e aumenta a tolerância à seca em áreas áridas ou semiáridas (MARULANDA et al., 2007).

As bactérias consideradas rizobactérias são assim classificadas pela capacidade promotora de crescimento das plantas em condições diversas, protegem as plantas dos efeitos deletérios de algumas tensões ambientais, estão envolvidas na síntese de fitormônios (ácido indolacético - IAA, ácido giberélico - GA e citocininas), ácido cianídrico (HCN) e amônia, com a capacidade de solubilizar fosfato mineral e antagonizar a ação das plantas a patógenos (GLICK, 1995).

Diversos trabalhos comprovam os efeitos benéficos e promissores para uma agricultura autossustentável por meio da inoculação com microrganismos em diversas culturas como tomateiro, feijão, milho, soja, eucalipto, batata e amendoim (ARAÚJO e HUNGRIA, 1999; LUCY et al., 2004; REMUSKA e PRIA, 2007; BRUNETTA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2016; SILVA et al., 2019).

Os resultados em plantas de milho sob estresse por deficiência hídrica mostrados por Sandhya et al. (2011), conferem características vantajosas da inoculação com o *B. subtilis* mostrando efeitos positivos no aumento da biomassa da planta, teor relativo de água, aumento no potencial hídrico foliar, a relação solo-tecido radicular, estabilidade agregada, perda de água nas folhas, osmorregulação referente ao aumento de prolina, açúcares, aminoácidos livres e diminuição do extravasamento de eletrólitos e redução das enzimas antioxidantes (ascorbato peroxidase, catalase, glutathione peroxidase).

O uso das rizobactérias do gênero *Bacillus* ssp. vem ganhando espaço na agricultura por suas inúmeras contribuições no crescimento, desenvolvimento, defesa e produção nas plantas. Ferreira e Bettiol (2019) afirmaram que diversos isolados de *Bacillus* podem ser úteis na promoção da sanidade do solo e na nutrição das plantas, ressaltando-se a interação já estabelecida dos *Bacillus* com as plantas de milho frisando a eficiência das bactérias na construção de uma agricultura sustentável.

3.3 Aspectos morfológicos da cultura do gergelim

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma espécie dicotiledônea, herbácea, oleaginosa, pertencente à família Pedaliaceae. Apresenta características bastante heterogêneas, com ciclo anual ou perene, podendo ser de caule ereto sem ramificações ou ramificado, atingindo entre 50 cm à 3 m de

altura, com ou sem pilosidade (BELTRÃO, 2001). O sistema radicular é pivotante, característica diretamente relacionada ao rendimento dos grãos (Su et al., 2019).

As folhas inferiores são mais largas na planta adulta, alternadas ou opostas, dentadas ou lobadas; enquanto as da parte superior são lanceoladas. As flores são completas e axilares, dispendo de 1 a 3 por axila foliar. Os frutos são encapsulados, deiscentes ou indeiscentes, com aproximadamente 2 a 8 cm de comprimento, de acordo com a variedade. As sementes variam da cor preta à branca, ocorrendo cores intercalares como bege e vários tons de marrom, com peso de 2 a 4 g (1000 sementes) dependendo das condições ambientais e da variedade (BELTRÃO et al., 2001).

3.4 O gergelim e sua importância econômica

O gergelim é uma das culturas, dentre as oleaginosas, mais antigas do mundo, há mais de 4000 anos, na Assíria e na Babilônia, já era uma oleaginosa altamente cotada. Apresenta em média 50% de óleo em sua composição (Queiroga et al., 2008; Yang e Huang, 2009; Gebregergis et al., 2018), é tido em alguns países (China, Japão e Coreia) como um alimento indispensável, pelo seu valor nutricional e sua aplicabilidade em uma gama de outros alimentos (Xu et al., 2018). Além disso, apresenta competências para aplicações medicinais, compreendendo funções anti-inflamatória e anti-hipertensiva (HSU et al., 2005; CHENG et al., 2006; NAKANO et al., 2010; GHARBY et al., 2017); na indústria pode ser utilizado para síntese de inseticidas, cosméticos e alimentação animal (CORRÊA et al., 1995; ANILAKUMAR et al., 2010).

A produção do gergelim acontece de maneira mais concentrada na África, uma vez que a cultura é própria dos gêneros encontrados no continente africano, seguido da Ásia que apresenta uma vasta riqueza e variedades das espécies cultivadas (ARRIEL e BELTRÃO, 2014; DOSSA et al., 2017). Trata-se de uma cultura com rentabilidade e demanda no mercado externo, mas também em expansão como no caso do Brasil, estimulada pela alta cotação no mercado internacional.

Os estados brasileiros que mais produzem gergelim são: Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Bahia e Minas Gerais. Na maioria dos Estados do Nordeste, a exploração ainda permanece em nível de subsistência, com poucos excedentes comercializáveis (IBGE, 2017). No Nordeste, contudo, o cultivo do gergelim vem crescendo em função das condições edafoclimáticas ideais para seu desenvolvimento e crescimento. Vale salientar que o gergelim apresenta tolerância à estiagem e seu cultivo gera renda para pequenos e médios produtores (EMBRAPA, 2007; QUEIROGA et al., 2008).

O Estado de Goiás, em 2015, respondia por aproximadamente 60% da produção nacional (7 mil toneladas de grãos) e 50% de área cultivada (10 mil hectares). Nesse mesmo estado, a produção passou

de uma área de 8 mil hectares para 10 mil ha, concentrada em 156 municípios, localizados nas mesorregiões do norte, noroeste, sudoeste e sul Goiano com destaque para 15 municípios. Nos últimos dez anos a cultura tem despertado o interesse de produtores do Centro-Oeste. Nesse mesmo ano (2015), o estado do Mato Grosso registrou um total de 20 mil hectares implantados com a cultura (ARRIEL, 2019).

Em 2017 e 2018 foram implantados, respectivamente, 15 mil e 33 mil hectares da cultura na região de Canarana-MT, já em 2019 foram registrados, pela Secretaria de Agricultura do Município de Canarana-MT, 60 mil hectares implantados com a cultura, um crescimento de aproximadamente 82% da área plantada. De acordo com dados oficiais registrados pelo Censo Agropecuário de 2017 (IBGE), o Brasil produziu 128.055 t de sementes em uma área cultivada de aproximadamente 9 mil hectares (ARRIEL, 2019).

Por intermédio de pesquisas exploratórias obtidas junto a grupos de produtores, empresários e secretarias da região Centro-Oeste, muitas informações são recolhidas para um conhecimento mais apurado sobre a situação do gergelim, tendo em vista que o IBGE, até cinco anos atrás, não fazia uma divulgação sistemática da produção agrícola e área plantada de gergelim no Brasil.

De acordo com os dados divulgados pela CONAB para a safra 2020/2021, a previsão total de gergelim é de uma área plantada de 143,5 mil hectares e produção estimada em 73 mil toneladas. O Estado do Mato Grosso, até então referência na produção de gergelim, tem registrado uma temporada com adversidades na safra 2020/2021, questões referentes ao manejo e a sementes, aliadas às condições climáticas, forçaram o plantio fora das condições ideais, introduzindo a cultura numa situação de severa falta de chuvas. Com 80,2% do gergelim já colhido, até o encerramento de julho, calcula-se rendimento médio de 509 kg/ha, 7% inferior ao registrado no ciclo passado, sendo assim as áreas plantadas em momento tardio sofreram a ponto de reduzirem sua produtividade final.

3.5 Condições de cultivo

A cultura do gergelim prefere solos de textura mediana com boa capacidade de armazenamento de água e bem oxigenado para a absorção de nutrientes; o gergelim, apesar da boa plasticidade fisiológica e fenotípica, necessita estar no seu ótimo ecológico em termo de clima e solo. São indicados solos arejados, franco-argilosos, ricos em matéria orgânica, bem drenados e com boa capacidade de retenção de umidade, em caso de correção, é recomendado o calcário de preferência dolomítico, que possui de 25% a 30% de cal virgem (CaO) e mais de 12% de óxido de magnésio (MgO). Em solo brasileiro, nas propriedades do Nordeste, o plantio dessa cultura ocorre especialmente em condições de

sequeiro, semimecanizado, preparando-se o solo com aração, plantio manual, tratos fitossanitários, colheita e beneficiamento (SILVA et al., 2009; RAMOS et al., 2010). Essa região dispõe de águas salinas uma vez que pelo processo de evaporação intenso é aumentado os níveis de sais no solo, e tratando-se do gergelim, que requer pH em torno de 7,0, deve-se levar em consideração que o pH do solo abaixo de 5,5 ou acima de 8,0 não é tolerado pela cultura que também é extremamente sensível a salinidade (GRILO JÚNIOR; AZEVEDO, 2013).

Os nutrientes como fósforo, potássio e nitrogênio, que são requeridos para os processos metabólicos, devem imprescindivelmente estar presentes no solo. O fósforo está envolvido nos processos metabólicos como absorção de nutrientes e a formação dos diferentes órgãos da planta (FRANDOLOSO, 2006) e o potássio atua no crescimento, desenvolvimento e qualidade de frutos dos vegetais (PRADO, 2008), já o nitrogênio estimula a divisão celular, refletindo no desenvolvimento da planta (ARRIEL et al., 2006).

O nitrogênio é bastante requerido pelo gergelim para síntese dos componentes armazenados nas sementes como proteínas e óleo, além do fósforo, potássio e enxofre. Dentre esses, os mais absorvidos são nitrogênio e potássio. A deficiência de N nas plantas de gergelim causa uma redução no crescimento e na produtividade da cultura, assim como efeitos prejudiciais nas folhas ocasionando a abscisão foliar (SILVA et al., 2009).

De acordo com Silva et al. (2009) a temperatura, precipitação, luminosidade e altitude são fatores cruciais que exercem influência no desenvolvimento do gergelim. A temperatura de 27°C é ideal para o crescimento e desenvolvimento da planta favorecendo também a germinação das sementes; abaixo de 20 °C provoca atraso na germinação e no desenvolvimento e abaixo de 10 °C todo o metabolismo fica paralisado, levando à morte da planta. Temperaturas superiores a 40 °C causam abortamento de flores e o não enchimento dos grãos; a qualidade das sementes e do óleo pode ser afetada por quedas de temperatura e por suas elevações.

O gergelim possui resistência estomática bastante elevada à falta de umidade, o que faz com que transpire menos nos períodos críticos e tolere à seca. A umidade do solo é benéfica para a floração e frutificação, sendo que chuvas intensas e frequentes provocam queda das flores e acamamento das plantas. A cultura requer de 160 a 180 mm de água nos primeiros 30 dias após a germinação e um acúmulo superior a 250 mm até o final dos primeiros 60 dias após o plantio. O máximo de rendimento é obtido com precipitações bem distribuídas durante as diversas fases do ciclo (SILVA et al., 2009).

3.6 Comportamento fisiológico do gergelim sob déficit hídrico

A água é o insumo mais importante das plantas, a sua redução no solo afeta de modo considerável seu metabolismo, influenciando no seu crescimento e na produção de sementes, ocasionando uma baixa fotossintética, provocando efeitos como a restrição na aquisição de nutrientes (TAIZ e ZEIGER, 2017; ASKARI et al., 2019). Além disso, provoca estresse oxidativo com o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), gerando uma cascata de reações, comprometendo o funcionamento das clorofilas e destruindo a membrana celular (GIL e TUTEJA, 2010; SHARMA et al., 2012). Desta forma, podemos afirmar que o déficit hídrico é um fator limitante para todas as culturas agrícolas, sendo um dos estresses abióticos mais limitantes ao crescimento, desenvolvimento e produtividade (MELO et al., 2010).

Em períodos de seca, a distribuição das raízes no solo e a cobertura foliar têm interferência na capacidade de tolerância, conferindo certa estabilidade na produtividade sem eliminação de perda evidente na produção. Dependendo do período em que ocorre a deficiência hídrica, da fenologia da planta, do genótipo e das condições do ambiente, pode levar a redução significativa do crescimento da planta e, assim, provocar perdas na produtividade (GARCIA et al., 1997).

Em plantas como o gergelim, o estresse mostra uma complexidade inerente ao processo e na resposta da planta, dependendo de vários fatores, como a duração do estresse, a fase fenológica, o tipo de solo e o genótipo (BELTRÃO, 2001). O gergelim traz a marca fisiológica da resistência estomática, esta por sua vez, confere um prolongamento de sua tolerância à seca (PERIN et al., 2010), contudo outros parâmetros indispensáveis para esclarecer os efeitos nutricionais e ambientais em relação a eficiência fotossintética são os pigmentos fotossintéticos e trocas gasosas.

Pigmentos fotossintéticos podem ser mensurados a partir de estratégias não destrutivas através de equipamentos portáteis como o clorofilômetro, possibilitando determinar os teores relativos de clorofilas *a*, *b* e totais. Esses pigmentos estão diretamente ligados ao estado nutricional das plantas, especialmente ao nitrogênio, tendo em vista que o teor total desse nutriente na razão foliar está concentrado nos cloroplastos (COELHO et al., 2018).

Conforme Lima et al. (2012) e Oliveira et al. (2014), o nitrogênio, além de promover o crescimento das plantas, está ligado a atenuação do estresse abiótico por suas funções estarem diretamente ligadas ao metabolismo dos vegetais, fazendo parte da composição dos pigmentos fotossintéticos. O nitrogênio pode ser encontrado em aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, prolina e compostos quaternários de amônio (glicina betaína), que aumentam a capacidade de ajustamento osmótico das plantas.

Já em relação as trocas gasosas, a transpiração é um fator crucial às plantas no que diz respeito a processos como a regulação da temperatura foliar. A transpiração ocorre nos estômatos, conhecidos também como células-guarda, poros microscópicos presentes na epiderme foliar que captam estímulos

bióticos e abióticos do ambiente interno ou externo e respondem rapidamente com mecanismos para o fechamento dos estômatos sob condições desfavoráveis (AGURLA et al., 2018), como o déficit hídrico, levando as plantas à condições estressantes.

Em decorrência de condições estressantes como déficit hídrico, estresse térmico e salino, as plantas geram estratégias para mitigar os efeitos deletérios das EROs. O fechamento estomático é um dos primeiros efeitos como estratégia para aumentar a resistência estomática, mantendo o fluxo de vapor d'água, assegurando o potencial hídrico (SILVA et al., 2018). Tal efeito pode resultar na limitação do fluxo normal do CO₂ para a câmara subestomática onde ocorre a carboxilação.

Os parâmetros envolvidos no processo do estresse são assim ajustados, a princípio em vista da aclimação às condições limitantes, com isso a transpiração diminui em decorrência do fechamento estomático, o que ocasiona a diminuição do vapor de água e entrada de CO₂ na célula (LACERDA et al., 2020). A diminuição da condutância estomática, conforme Silva et al. (2021), foi observada em plantas de gergelim sob condições de estresse salino, influenciando negativamente as plantas na assimilação de CO₂, obtendo menores valores na taxa de fotossíntese líquida.

Em resposta ao estresse hídrico as plantas possuem mecanismos de defesa naturais, hormonais e enzimáticos, que são ativados de acordo com a interação planta-ambiente. O estresse hídrico induz limitação estomática à fotossíntese, diminui a atividade de enzimas como a catalase e ascorbato peroxidase, resultando na elevação de H₂O₂ e ocasionando assim a peroxidação lipídica da membrana plasmática da célula vegetal (CHU et al., 2017).

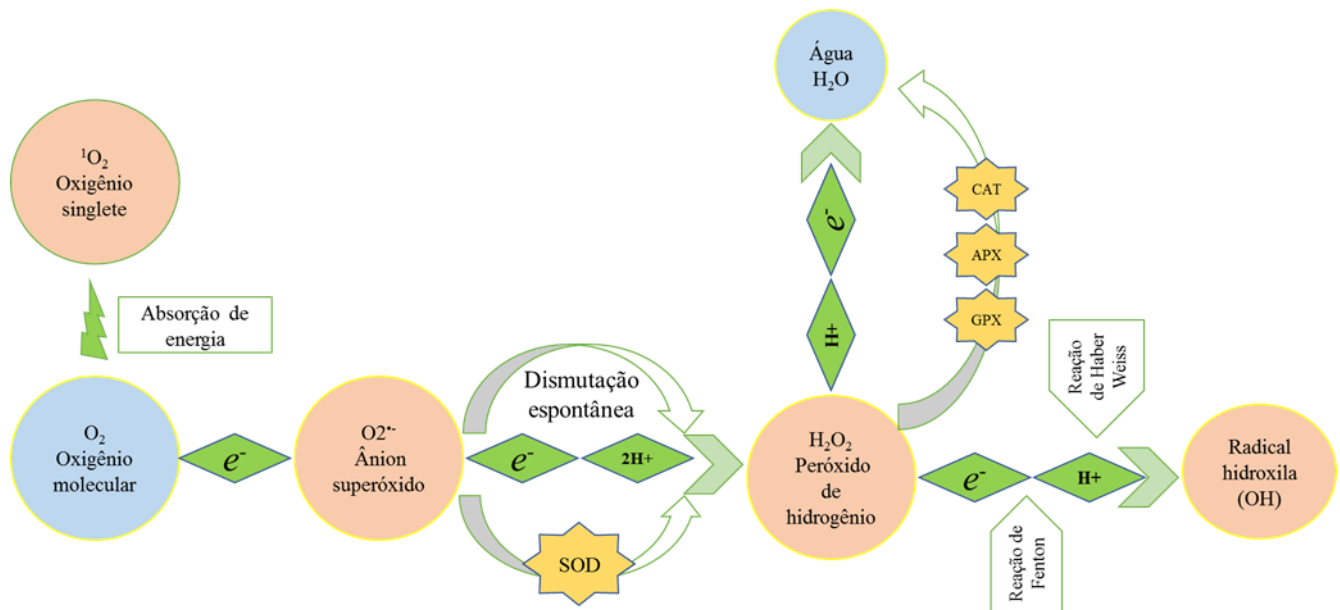
O sistema de defesa antioxidativo inclui um complexo com várias enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POX) e ascorbato peroxidase (APX), quando as plantas entram em estresse oxidativo por algum fator, como o estresse hídrico ou salino, essas enzimas atuam em várias seções subcelulares para evitar danos na célula vegetal, o estresse hídrico, por sua vez, leva a um aumento na concentração de carotenoides, na atividade da SOD, CAT, POX e APX no gergelim (HUSSEIN et al., 2016; YOUSEFZADEH-NAJAFABADI e EHSANZADEH, 2017).

O estudo da atividade antioxidante das enzimas (SOD, CAT e APX) pode ser utilizado como fator indicativo de estresse abiótico (seca, salinidade), pois revela deteriorações nas membranas celulares vegetais e sementes de gergelim. Sob estresse hídrico as plantas diminuem drasticamente sua qualidade fisiológica e fotossintética refletindo essas baixas nos teores de clorofilas, carotenoides e açúcares solúveis totais (RODRIGUES, 2019).

As enzimas antioxidantes atuam de maneira concatenada (Figura 1) para estabelecer uma máxima eficiência a defesa da planta sob alguma condição adversa (seca, alta salinidade etc.). A primeira linha de defesa, segundo Alscher (2002), é representada pela superóxido dismutase atuando na dismutação de radicais superóxido gerados pelas EROs à peróxido de hidrogênio e oxigênio. Breusegem

et al. (2001) afirmaram que as catalases são as principais enzimas que convertem o peróxido de hidrogênio decorrente da fotorrespiração em H_2O e oxigênio molecular (O_2). Assim como as catalases, a ascorbato peroxidase também atua na defesa primária atenuando na célula vegetal os efeitos deletérios das EROs, especialmente em plantas sob déficit hídrico (SOUSA et al., 2015).

Figura 1 - Espécies reativas de oxigênio, dano oxidativo e mecanismo de defesa antioxidante em plantas sob condições estressantes



Fonte: Sharma et al., 2012 (com adaptações). SOD - Superóxido dismutase; CAT - Catalase; APX - Ascorbato peroxidase; GPX - Glutationa peroxidase.

Outro sistema indicador de estresse hídrico e osmorregulador é formado pela prolina, um aminoácido que em plantas sob deficiência hídrica age promovendo a osmorregulação, por conseguinte seu acúmulo gera a homeostase, ou seja, o equilíbrio no interior da célula (LIN et al., 2002) estabelecendo um ajuste osmótico favorecendo a célula na tolerância a condições adversas mantendo a integridade e turgescência celular. De acordo com Blum (2017), a manutenção do turgor celular é crucial sob condições de seca, pois está envolvida no arranjo estomático, assim também faz parte no processo da capacidade fotossintética.

O acúmulo de prolina já é reconhecido como um importante indicador de estresse abiótico em plantas, mostrando-se capaz de aumentar a capacidade das plantas para superar menores potenciais hídricos, uma vez que esse osmólito apresenta particularidade de tamponamento sob efeito de escassez de água (JALEEL et al., 2007; OZTURK et al., 2021).

Os trabalhos que abordam as condições fisiológicas e bioquímicas em gergelim são limitados e por isso carece de uma exploração mais profunda mediante a necessidade de se entender como essas plantas respondem a fatores adversos bióticos e abióticos. Sabendo-se que a cultura do gergelim está em ascensão comercial, com aproximadamente 230% de aumento do cultivo ao ano, é de suma importância estudos para melhoria do desempenho dessa cultura.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Implantação, condução e coleta do experimento em casa de vegetação

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Algodão, localizada em Campina Grande, PB (07°13'S; 53°31'W). Foram utilizados dois genótipos de gergelim (BRS Seda e BRS Anahi) cultivados em vasos de plástico com capacidade para 20 L, preenchidos manualmente com solo do tipo franco-arenoso. O solo foi previamente analisado no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da Embrapa Algodão (Tabela 2), pelo método descrito por Silva (2009), corrigido com calcário dolomítico e fertilizado com nitrogênio (N) distribuídos em duas aplicações, a primeira aos 10 dias após a emergência (DAE) e a segunda no início da floração (30 DAE). A aplicação de fósforo (P) e potássio (K) foi feita para todos os tratamentos, conforme recomendações de Gomes e Coutinho (1998) com base na análise do solo.

Os genótipos de gergelim BRS Anahi e BRS Seda (BRS - sigla utilizada para caracterizar materiais provenientes de melhoramento genético liderado pela EMBRAPA) possuem características peculiares como cultivares voltadas para um potencial de produtividade, as respectivas características estão discriminadas na tabela 1.

A terminologia aplicada como “cultivar” remete a variedade ou cultivar de qualquer gênero ou espécie vegetal superior que possui características distintas, homogêneas e estáveis por meio de sucessivas gerações de cultivo, com identidade própria. A escolha de uma cultivar de gergelim está diretamente ligada a fatores de adaptação edafoclimáticas de cada região, no entanto a cultivar deve apresentar estabilidade, potencial de rendimento de grãos, resistência ou tolerância a doenças (SILVA et al., 2009).

Tabela 1 - Características morfoagronômicas dos genótipos de gergelim BRS Anahi e BRS Seda, Embrapa Algodão, Campina Grande, PB. (Fonte: Tabela adaptada da Embrapa-CNPA, 2007-2015 <https://ainfo.cnptia.embrapa.br>).

BRS Anahi	BRS Seda
Porte mediano, ciclo de 90 dias, hábito de crescimento não ramificado, início da floração aos 30 dias após a germinação, três cápsulas deiscentes por axila foliar, sementes com coloração esbranquiçada, peso médio de mil sementes 4,22 mg, teor de óleo varia de 50 a	Porte mediano, ciclo de 90 dias, hábito de crescimento ramificado, início da floração entre 30 e 35 dias após a germinação, , uma cápsula deiscente por axila foliar, sementes brancas, peso médio de mil sementes 3,22 mg, teor de óleo varia de 50 a 52%; tolerância à murcha de

52%; tolerância à murcha de macrofomina, mancha angular e cercosporiose, potencial para 1.600 kg/ha de sementes em condições ideais de solo, água e manejo da cultura.	macrofomina, mancha angular e cercosporiose, potencial para 2.500 kg/ha de sementes, em condições ideais de solo, água e manejo da cultura.
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021.

Tabela 2 - Análise dos componentes físico-químicos do solo (Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas. Embrapa Algodão, Campina Grande, PB, 2020).

Fertilidade do solo											
pH	Complexo Sortivo (mmolc/dm ³)							%	mmolc/dm ³	mg/dm ³	g/kg
	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	S	H+Al	T				
5,4	20,9	24,4	1,8	2,8	49,9	49,5	99,4	50,2	0,5	105,8	15,1

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021. (pH – Concentração de hidrogênio em solução do solo; Ca⁺² - Cálcio; Mg⁺² - Magnésio; Na⁺ - Sódio; K⁺ - Potássio; S - enxofre; H+Al - Acidez potencial ou total; T – Capacidade de troca catiônica (CTC) subtraída da soma de bases (SB) mais o alumínio (Al); Al⁺³ – Acidez trocável; P – Fósforo; M.O. – Matéria orgânica)

As sementes de gergelim foram desinfestadas com etanol puro por 15 segundos, hipoclorito de sódio 1% por 1 minuto e por fim lavadas 5 vezes com água destilada estéril para retirada de qualquer tipo de resíduo (VINCENT, 1970). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, estabelecido por processo randômico em esquema fatorial 2 (genótipos) x 2 (regime hídrico) x 6 (fontes de variação), totalizando 24 tratamentos com 5 repetições. Os tratamentos foram caracterizados em: (i) manejo com nitrogênio químico (sulfato de amônio, SAM; 21% de N) com e sem aplicação de N; (ii) manejo com 4 inoculantes a base de bacilos (*B. subtilis* estirpe pant001, cedido pela empresa Geoclean, ESA 13, ESA 402 e M143, estirpes cedidas pela Embrapa Semiárido, Petrolina, PE); (iii) testemunha absoluta; sob dois regimes hídricos (com e sem irrigação).

O plantio foi realizado no dia 19 de novembro de 2020, foram semeadas dez sementes de cada genótipo por vaso, após 10 dias da emergência das plântulas foi realizado o desbaste, deixando-se apenas duas plantas por vaso. No início da floração (30 DAE) suspendeu-se a rega e fez-se o acompanhamento do fechamento estomático com o auxílio de um IRGA. Foi estabelecido o estresse por 8 dias, mediante o fechamento estomático próximo a 90%, quando interrompeu-se o estresse e as plantas foram reidratadas. No período da suspensão da rega, apenas as plantas controles foram irrigadas, mantendo-se a umidade próxima à capacidade de campo.

4.2 Cultivo das bactérias e preparo dos inoculantes

As estirpes (ESA 13, ESA 402 e M143) foram estriadas em meio sólido LB (Luria Bertani), composto por caseína, extrato de levedura, triptona, NaCl e ágar (EMBRAPA, 1999) e incubadas por 24 horas a 28 °C. Em seguida, coletou-se uma colônia bacteriana de cada estirpe e inoculou-se em um tubo Falcon (50 mL) esterilizado, contendo 20 mL de meio líquido LB. As estirpes foram então incubadas em Shaker a 28 °C, 180 rpm, por 72 horas.

A densidade óptica (DO) foi avaliada em espectrofotômetro com comprimento de onda de 540 nm. Uma alíquota de 1 mL de cada inoculante foi utilizada para avaliar e mensurar a UFC/mL das estirpes. Em uma centrífuga as alíquotas com o inoculante foram colocadas sob rotação constante de 6000 rpm por 1 minuto. O sobrenadante foi descartado deixando-se o pellet e foi adicionado 1 mL de água destilada esterilizada, após a solubilização do pellet coletou-se 1 mL do solubilizado e aferiu-se os valores em espectrofotômetro. O pH dos inoculantes também foi analisado, utilizando-se uma fita com escalas de pH, conferindo 7 (neutro) para todos.

As sementes (previamente desinfestadas) foram colocadas em placas de Petri e adicionou-se os inoculantes em quantidade suficiente para cobrir as sementes. Após incubação de 10 minutos, as sementes foram distribuídas em valas feitas manualmente no solo com aproximadamente 2 cm de profundidade, com auxílio de pinças para coletar as sementes. Para evitar contaminação as pinças foram trocadas a cada inoculante. Vale ressaltar que o solo foi regado algumas horas antes do plantio das sementes inoculadas para evitar que a alta umidade prejudicasse a associação das estirpes com as sementes no solo.

4.3 Variáveis agronômicas

Foram avaliadas as seguintes variáveis de crescimento: altura de planta (cm), medida desde a base até o ápice da haste principal da planta utilizando-se uma trena métrica; diâmetro do caule com um paquímetro, número de cápsulas por planta; massa seca da parte aérea (g) e de raízes (g), determinadas pela secagem do material em estufa com circulação de ar forçada a 65 °C, por aproximadamente 72 horas, até atingir massa constante, e pesagem em balança de precisão; e massa de 1000 sementes (MMS).

4.4. Trocas Gasosas

As plantas de gergelim foram avaliadas no período da manhã entre 9:00 e 11:00 horas, durante a fase de déficit hídrico, utilizando um analisador portátil de fotossíntese (IRGA - Infra Red Gas Analyzer, modelo LCpro-SD), sem fonte artificial de carbono e com fonte luminosa artificial de 1200

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ m}^{-1}$. Foram avaliados os seguintes parâmetros: condutância estomática (g_s) ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); fotossíntese (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); transpiração (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e concentração interna de CO_2 (C_i) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$). A partir dos dados obtidos foram calculadas a eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) entre A e C_i (A/C_i) e a eficiência do uso da água (EUA) entre A e E (A/E) (MAGALHÃES FILHO et al., 2008). Foram realizadas três avaliações no período da suspensão hídrica (1D; 4D; 8D “D=Dias”) e mais três avaliações no período de reidratação. Uma das finalidades das avaliações foi acompanhar o fechamento estomático, quando as plantas sob estresse hídrico atingiram próximo a 90% de fechamento estomático foi retomada a rega e avaliado durante a reidratação a recuperação da atividade estomática. Também foi avaliada a fluorescência das plantas utilizando-se o fluorômetro portátil, com o qual foram estimadas a fluorescência inicial (F_o), fluorescência variável (F_v), fluorescência média (F_m) e a relação entre a F_v/F_m .

4.5 Análise de nitrogênio

A análise de nitrogênio total da parte aérea das plantas foi baseada no método de digestão sulfúrica desenvolvido por Kjeldahl e descrito por Bezerra Neto e Barreto (2011). Ao final do experimento, a parte aérea das plantas foi coletada, armazenada em sacos de papel kraft e colocada em estufa de circulação de ar forçada a $65\text{ }^\circ\text{C}$ por 72 horas, depois triturada em moinho. Uma alíquota do material vegetal seco (2 mg), 50 mg de sulfato de sódio, 0,5 mg sulfato de cobre (5%) e 5 mL de ácido sulfúrico foram misturados para a pré-digestão a frio em temperatura ambiente durante 12 horas, em seguida a solução foi aquecida em um bloco digestor a $350\text{ }^\circ\text{C}$ até que toda matéria orgânica estivesse dissolvida e a solução clara. Uma alíquota de 1 mL do extrato digerido foi adicionada em um balão volumétrico (50 mL) contendo 40 mL de água deionizada, 1 mL de hidróxido de sódio (10%), 1 mL de silicato de sódio (10%) e 2 mL do reagente de Nessler, o volume foi completado com água deionizada para 50 mL. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 410 nm. A partir do teor de nitrogênio foi calculado o nitrogênio acumulado na parte aérea, multiplicando o teor de nitrogênio pela massa seca da parte aérea, de acordo com Alcantara et al. (2014).

4.6 Atividades enzimáticas

Uma amostra de 0,2 g de folhas frescas foi coletada no oitavo dia de restrição hídrica do experimento, imediatamente imersa em N_2 líquido e em seguida armazenada a $-80\text{ }^\circ\text{C}$ para posterior extração proteica. Para a extração de proteínas, as folhas foram maceradas em N_2 líquido e adicionados 3 mL de tampão fosfato de potássio 0,1 M, pH 7,0, contendo EDTA 100 mM, L-ácido ascórbico 1 mM

e 4% de polivinilpolipirrolidona (PVP). A quantificação proteica foi feita pelo método de Bradford (1976) em espectrofotômetro a 595 nm.

A atividade enzimática da superóxido dismutase (SOD) foi determinada pelo método de GIANNOPOLITIS e RIES (1977) com 40 μL de extrato proteico foliar, 1,5 mL de tampão fosfato de potássio 100 mM pH 7,8, contendo EDTA 1 mM, metionina 13 mM, azul p-nitrotriazólio (NBT) 75 mM e 460 μL de riboflavina 1 mM. A solução resultante foi realizada em triplicata de amostras, exposta a luz fluorescente (75 W) e as mesmas condições no escuro, por 40 minutos e analisadas em espectrofotômetro a 560 nm. Os resultados foram expressos em atividade UA g MF^{-1} correspondendo a 50% da inibição da redução do NBT.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada de acordo com Azevedo et al. (1998). Uma alíquota de 100 μL do extrato proteico foliar foi misturada a 2,9 mL de tampão fosfato de potássio 100 mM, pH 7,0 contendo H_2O_2 40 mM. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 240 nm.

Para determinar a atividade da ascorbato peroxidase (APX), alíquotas de 50 μL do extrato proteico foliar foram adicionadas a 2 mL de tampão fosfato de potássio 50 mM, pH 6,0, contendo ácido ascórbico 5 mM, 100 μL de H_2O_2 4 mM e analisada em espectrofotômetro a 290 nm, baseada no método de Nakano e Asada (1981).

4.7 Teor de Prolina livre total

Para o teor de prolina livre foi utilizada a metodologia descrita por Bates et al. (1973). Uma curva padrão de prolina foi preparada com uma solução estoque a 10 mM e uma padrão a 1 mM, sendo a padrão uma diluição do estoque de 1:10 (v/v) (1 mL da solução estoque + 9 mL de água destilada). Para a extração, 100 mg de tecido vegetal foi pesado em balança de precisão e armazenado a -80°C , em seguida foi macerado com auxílio de um cadinho e pistilo acrescentando-se ácido sulfossalicílico (3%), 9 g do ácido foi homogeneizado em 290 mL de água destilada completando o volume final para 300 mL. Uma alíquota de 2 mL da solução resultante foi transferida para um microtubo de 2 mL e centrifugada por 10 minutos a 2000 rpm em temperatura ambiente, coletando-se em seguida o sobrenadante. A ninhidrina ácida (2,5 mg) foi dissolvida em 60 mL de ácido acético glacial P.A (99%) e 40 mL de ácido fosfórico 6 M, em agitador magnético com auxílio de um bastão magnético sob aquecimento de 40°C por 5 minutos. A reação foi conduzida no escuro e no momento requerido para a utilização da mesma.

A marcha analítica deu-se sequência submetendo as amostras em água sob aquecimento de $\sim 100^\circ\text{C}$, em tubos de ensaio. Uma alíquota de 1000 μL do sobrenadante foi utilizada para reagir com 1000 μL de ninhidrina ácida e 1000 μL de ácido acético glacial em um tubo de ensaio hermeticamente fechado

e aquecido durante 1 hora a 100 °C, em seguida resfriada em gelo. A leitura procedeu-se adicionando 2 mL de tolueno para suspender o material orgânico o qual foi avaliado em espectrofotômetro a 520 nm. O volume final da solução compreendeu 5 mL (1 mL da amostra + 1 mL da ninhidrina + 1 mL do ácido acético + 2 mL do tolueno).

Os teores de clorofila a, b e total (a+b) e de carotenoides foram determinados a partir do método de extração em acetona 80% (LICHTENTHALER, 1987). Todo procedimento foi realizado na presença de luz verde, evitando assim a degradação da clorofila. Nessa metodologia, 200 mg do tecido vegetal foram macerados em N₂ líquido e depois solubilizados em 10 mL de acetona 80%. Posteriormente, a solução foi filtrada em papel filtro qualitativo e as seguintes absorvâncias (ABS) foram quantificadas: 470, 646.8, 663.2 e 710 nm.

4.8 Análises estatísticas

Os dados coletados foram analisados usando o programa estatístico SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2014), submetidos à análise de variância ($P \leq 0,05$) e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Também foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk para verificação e correção da heterogeneidade dos dados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis agronômicas

As sementes de gergelim inoculadas com os bacilos apresentaram, de maneira geral, uma germinação rápida, com aproximadamente 100% de emergência das plântulas a partir do terceiro dia após o plantio. As sementes tratadas com o inoculante contendo *Bacillus subtilis* pant001 (Geoclean), demonstraram emergência completa aos 9 dias após a semeadura tanto para o genótipo BRS Anahi quanto para BRS Seda. O genótipo BRS Anahi iniciou sua floração aos 30 dias após sua emergência (DAE), enquanto o genótipo BRS Seda iniciou aos 48 dias DAE. Durante o ciclo dos dois genótipos foi possível identificar formatos de folhas variados: ovaladas, trifoliadas e alongadas; esta característica é relevante para a produtividade sendo a área foliar um indicativo modelador de crescimento e desenvolvimento (LIMA, 2013).

As plantas dos dois genótipos apresentaram alta sensibilidade a suspensão da rega nas primeiras 24 horas (30 DAE), com sinais de murcha, folhas enroladas, curvadas para baixo e com presença de tricomas. Foi observada uma substância viscosa em todas as plantas do estresse, esta pode estar ligada a polissacarídeos com função osmorreguladora e protetora, porém a substância não foi submetida a análise. Outro ponto bastante acentuado foi a abscisão foliar e o abortamento de flores em todas as plantas estressadas, mostrando uma estratégia para economia de água e energia nesse período crítico (Seleiman et al., 2021).

Para a altura da primeira flor, no genótipo BRS Anahi inoculada com *B. subtilis* foi observado flores a partir dos 15 cm de altura assim como nos demais tratamentos, mesmo com a germinação tardia a floração não foi comprometida. Na condição estresse, o genótipo BRS Anahi promoveu abortamento floral e abscisão foliar na haste principal, no intervalo que variou entre 16 e 42 cm de altura, voltando a floração após a reidratação. As cápsulas variaram de 3,3 a 4 cm com 51-75 sementes por unidade capsular. Para o genótipo BRS Seda foi observada a primeira flor a partir dos 22 cm e as cápsulas variaram de 3 a 4 cm com 47-82 sementes.

Os genótipos em interação com os tratamentos apresentaram significância pela interação tripla (Genótipo x Regime hídrico x Tratamentos) quando submetidos a testagem pelo teste F a $p \leq 0,01$ (altura, diâmetro do caule e massa seca da parte aérea) e $p \leq 0,05$ (massa seca da raiz) (Figura 2).

Tendo como base os resultados estatísticos, foi possível identificar que para a variável altura da planta (ALT), na condição controle não houve diferença significativa entre os tratamentos para o genótipo BRS Anahi. Na condição de estresse, o *B. subtilis* e o manejo nitrogenado apresentaram as melhores médias, no entanto, não houve diferença significativa quando comparados a ESA 13 e M143. Para o genótipo BRS Seda, na condição controle não houve diferença significativa entre os inoculantes

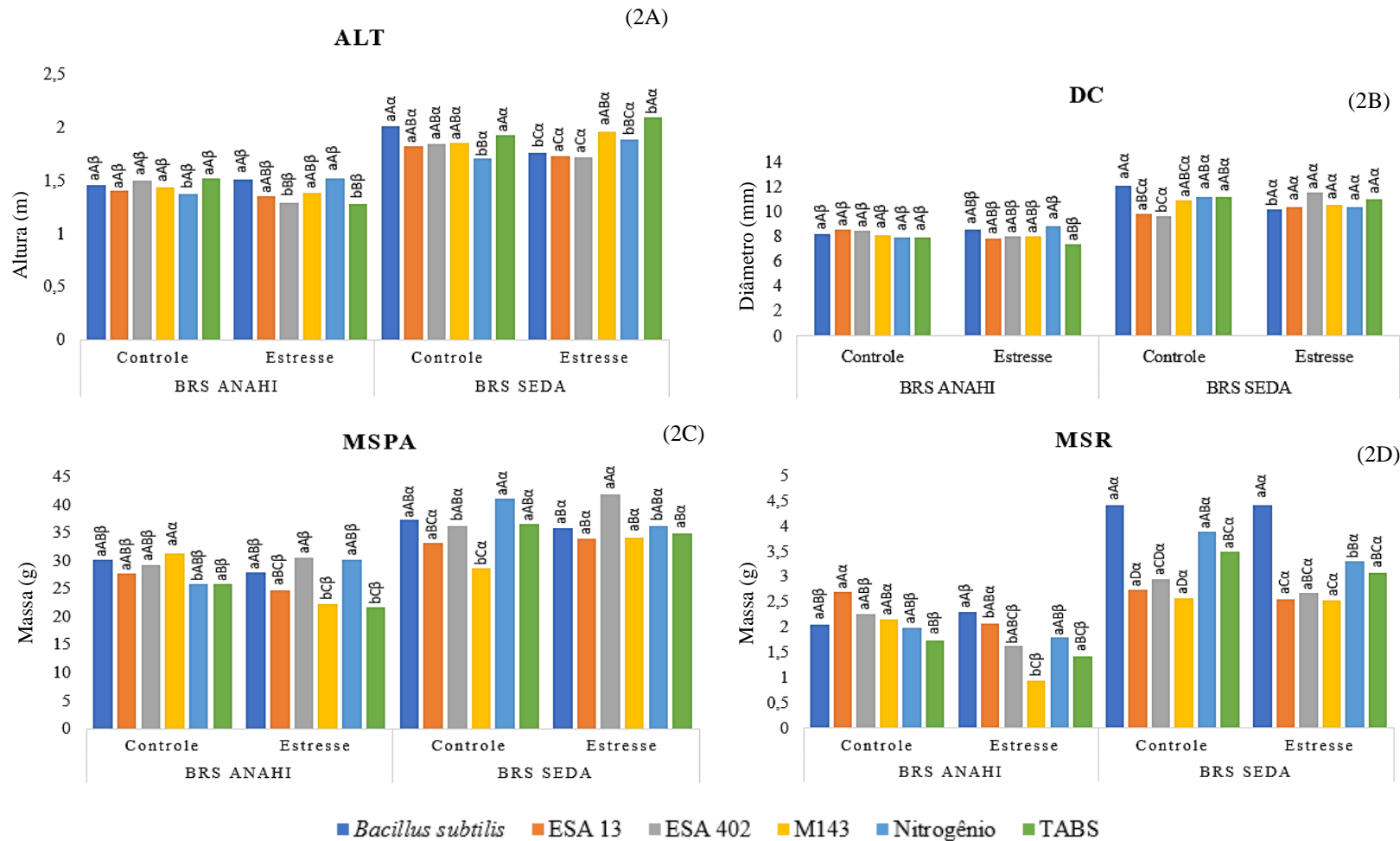
e o TBAS, mas na condição de estresse a TABS, M143 e o manejo nitrogenado foram mais significativos para essa variável (Figura 2A). De acordo com Lin et al. (2019) e Valderrama e Botelho (2021), as RBPC podem reduzir potencialmente a fertilização com N inorgânico sem afetar os parâmetros de crescimento em milho, comprovando a eficiência de *Bacillus* sp. como promotores de crescimento quando confrontados com um fertilizante químico nitrogenado.

Em síntese, os genótipos de gergelim tratados com os bacilos demonstraram uma interação positiva para a altura de planta, quando comparadas com o TABS e o manejo nitrogenado. Estudos em plantas de gergelim tratadas com fertilizantes orgânicos e químicos mostraram médias inferiores às encontradas neste trabalho (MESQUITA, 2010; PERIN et al., 2010; GRILO JÚNIOR, 2013). Em amendoim, Brito et al. (2019) mostraram redução da altura das plantas sob estresse hídrico, porém observou-se uma redução mínima nas que foram tratadas com estirpes bacterianas, fato que também pode ser observado para essa variável (ALT) no presente estudo.

Para o diâmetro do caule (DC) não foi observado diferença significativa dos inoculantes no genótipo BRS Anahi para a condição controle; na condição estresse o *B. subtilis* e o manejo nitrogenado apresentaram-se com melhores médias. O genótipo BRS Seda teve uma interação positiva na condição controle com o *B. subtilis*, no entanto quando submetido a restrição hídrica a estirpe ESA 402 apresentou-se mais eficiente no DC, porém, não diferiu estaticamente dos demais tratamentos (Figura 2B).

Quando avaliada a massa seca da parte aérea (MSPA) (Figura 2C) para o genótipo BRS Anahi, na condição controle houve diferença significativa e os tratamentos inoculados com os bacilos apresentaram as melhores médias em relação ao N e o TABS; na condição estresse, a estirpe ESA 402 e N apresentaram as maiores médias, *B. subtilis* e ESA 13 também apresentaram efeitos positivos quando comparado a TABS; o efeito da M143 não diferiu estatisticamente da TABS.

Figura 2 - Variáveis agrônômicas: **Altura (ALT); **Diâmetro do caule (DC); **Massa seca da parte aérea (MSPA); *Massa seca da raiz (MSR), submetidos a nível de significância **1 e *5% pelo teste F de dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos, sob restrição hídrica. Testemunha absoluta (TABS). Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; letras gregas comparam os genótipos.



No genótipo BRS Seda houve aumento significativo da MSPA, na condição estresse, para a estirpe ESA 402. Por características particulares próprias de cada genótipo, houve diferença significativa para a MSPA. Mesquita et al. (2013) confirmaram os efeitos significativos da restrição hídrica para MSPA, ALT, NCP e produtividade em gergelim a partir do trigésimo dia após o plantio, resultados que corroboram com os apresentados neste estudo. Achados com genótipos de amendoim descritos por Brito et al. (2019) tratados com estirpes bacterianas apresentaram diferenças mínimas em relação a restrição hídrica corroborando com os dados apresentados neste trabalho.

Em relação a massa seca da raiz (MSR), o genótipo BRS Anahi inoculada com a estirpe ESA 13 apresentou melhor média para o controle; na condição estresse, o *B. subtilis* apresentou maior MSR, seguido de ESA 13, manejo nitrogenado e ESA 402; a estirpe M143 teve sua atividade reduzida em mais de 50% em relação a condição controle. No genótipo BRS Seda, os resultados para MSR foram bastante semelhantes entre as condições irrigada e não irrigada. Contudo, *B. subtilis* foi a estirpe que apresentou a maior média não diferindo o estresse do controle, seguido do manejo nitrogenado e ESA 402 (Figura 2D).

Mediante estes achados é possível identificar uma contribuição significativa dos inoculantes para os atributos agrônômicos dos genótipos de gergelim investigados, implicando numa ação benéfica e uma alternativa biossustentável para a cultura, com vistas para redução e/ou até substituição dos fertilizantes químicos. De acordo com Mitter et al. (2019) o uso desses biofertilizantes antes, durante e depois do estresse ambiental pode promover ajustes nos mecanismos de defesa nas plantas e aumentar a capacidade de retenção de água do solo, crescimento e desempenho da raiz.

Em relação ao número de cápsulas por planta (NCP) e o massa de mil sementes (MMS), o NCP foi significativo a $p \leq 0,01$ para interação tripla e o MMS não apresentou significância em 1% e 5% na interação tripla (Figura 3). O NCP estaria supostamente ligado a produção final concedendo uma estimativa de causa e efeito, quanto mais cápsulas por planta mais sementes, o que aumentaria também a massa. No entanto, fatores como alta temperatura e restrição hídrica podem prejudicar o enchimento das sementes, como observado nesse experimento. É importante ressaltar que para o NCP, as estirpes ESA 402 e *B. subtilis* demonstraram uma interação positiva e significativa para ambos os genótipos (Figura 3A).

A MMS foi significativa a $p \leq 0,01$ para fator isolado (Genótipo; Regime hídrico e Tratamentos) e $p \leq 0,05$ para interação dupla (Genótipo x Regime hídrico e Regime hídrico x Tratamentos) conforme valores apresentados na tabela 3. Em relação ao fator Genótipo para MMS, o genótipo BRS Anahi obteve a melhor média (3,99); para o fator tratamentos a ESA 402

demonstrou melhor desempenho (3,57), seguida da ESA 13, M143, *B. subtilis*, TABS (3,53; 3,50; 3,49; e 3,34; respectivamente) e o N com menor média (2,94). Na interação dupla GEN x RH o genótipo que apresentou melhores médias tanto na condição controle (4,44 g) quanto no estresse (3,55 g) foi BRS Anahi.

Figura 3 - Número de cápsulas por planta (NCP) com interação tripla GEN x RH x Trat, $p \leq 0,01$ (A) e massa de mil sementes (MMS) (B) de dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos, sob restrição hídrica. Testemunha absoluta (TABS). Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; letras gregas comparam os genótipos.

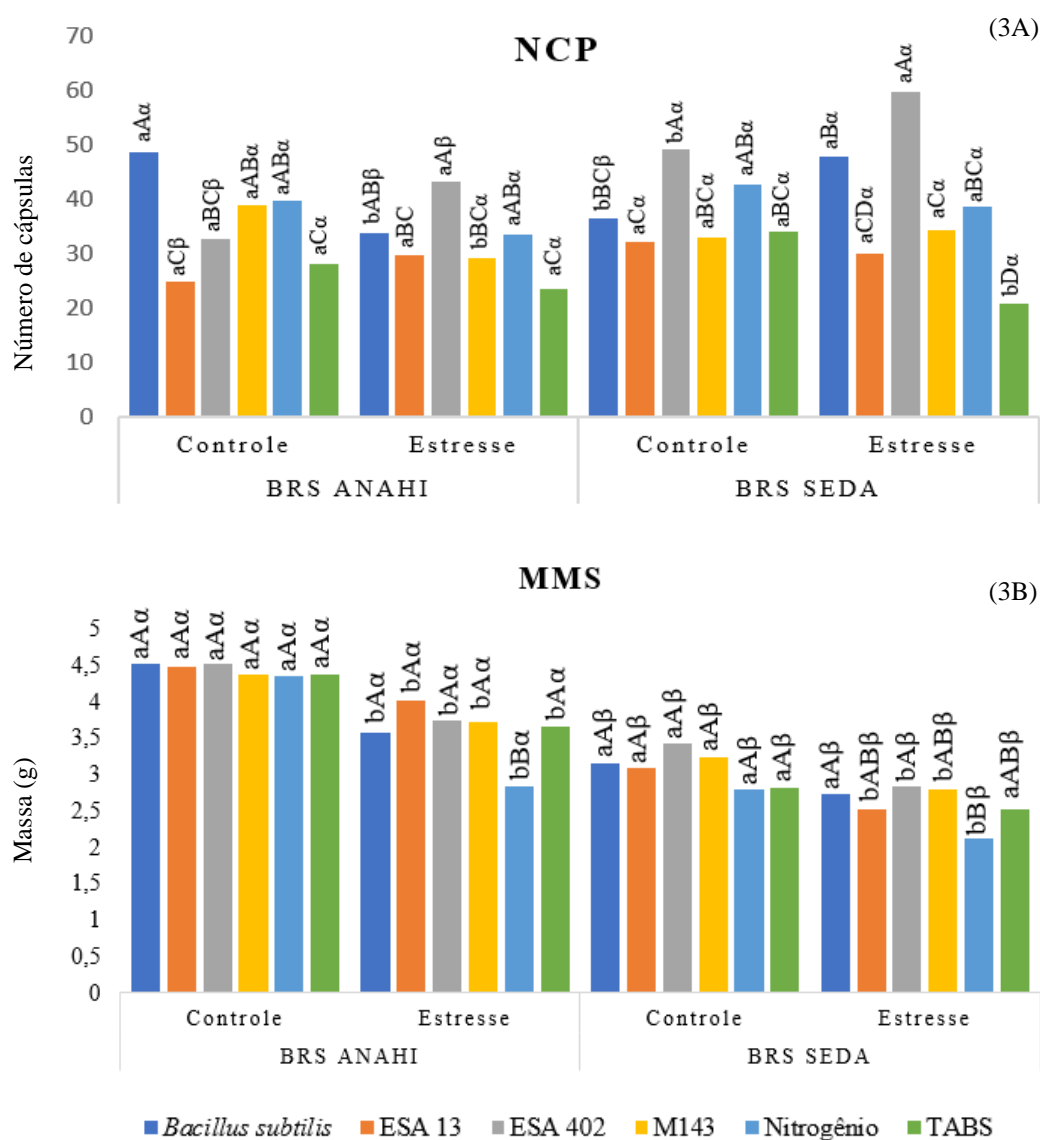


Tabela 3 - Resumo do quadrado da massa de mil sementes (MMS) e do número de cápsulas por planta (NCP), de dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos, sob restrição hídrica.

Fonte de variação	GL	Variável	
		NCP	MMS
Genótipos (GEN)	1	580,8000**	25,6913**
Regime hídrico (RH)	1	53,3333**	9,6484**
Tratamentos (TRAT)	5	1130,4533**	0,6681**
GEN x RH	1	116,0533*	0,4403*
GEN x TRAT	5	190,0600**	0,0864 ^{ns}
RH x TRAT	5	226,5533**	0,2453*
GEN x RH x TRAT	5	211,6933**	0,0815 ^{ns}
Resíduo	96	28,8125	0,0992
CV (%)		14,90	9,27

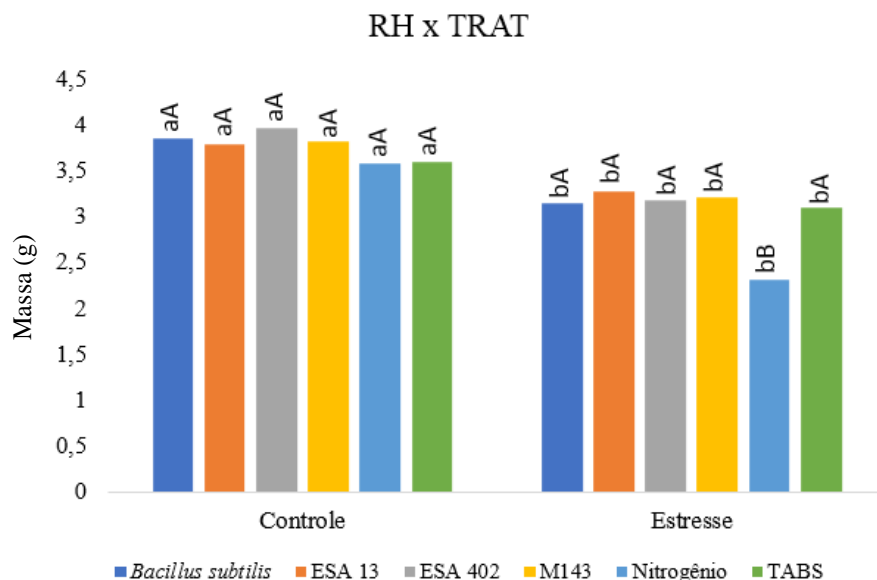
Fonte: Elaborada pelo autor, 2021. (ns – não significativo; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$)

Ainda em relação a MMS, Jadhav et al. (2015) avaliaram a fertilização com nitrogênio em gergelim e encontraram 2,87 g para a MMS. Campos et al. (2014) avaliaram as características biométricas de plantas de gergelim e encontraram para a MMS 3,8 g para o genótipo BRS Seda.

Para o MMS, as estirpes promoveram médias superiores ao tratamento nitrogenado, contudo, os inoculantes não promoveram diferença significativa entre si para a condição controle, incluindo o manejo nitrogenado e a TABS na interação dupla (RH x TRAT, Figura 4). Já para a condição estresse, houve o mesmo comportamento das estirpes, diferindo apenas do N que apresentou a menor média, sendo assim mais sensível ao estresse na produção de sementes viáveis. Estes achados podem ser indícios de que os inoculantes biológicos são capazes de sustentar as plantas sob condições de restrição hídrica e consequentemente favorecer a produtividade de forma positiva, uma vez que as variáveis agrônômicas, além da produção, também foram favorecidas.

De acordo com Lima et al. (2013), a interação entre irrigação e biofertilizante potencializam a capacidade de produção em gergelim. Os autores encontraram uma produção média de 192 frutos / planta quando as plantas foram tratadas com biofertilizante bovino em interação com a lâmina de irrigação.

Figura 4 - Interação dupla entre regime hídrico e tratamentos com diferentes inoculantes a base de bacilos, com significância a $p \leq 0,05$ para a MMS de dois genótipos de gergelim, sob restrição hídrica. Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; letras gregas comparam os genótipos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

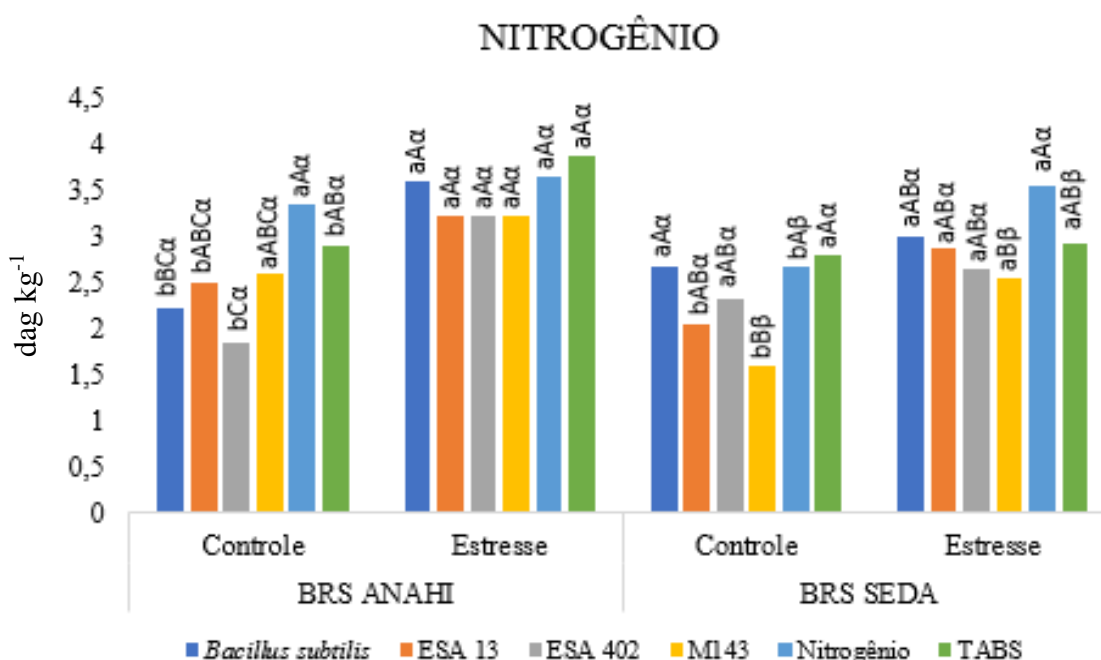
5.2 Análise de nitrogênio nas folhas

A análise de nitrogênio ($p \leq 0,05$) em tecido foliar mostrou um aumento em todos os tratamentos na condição estresse para os dois genótipos investigados (Figura 5). Este acúmulo de N na fase final do experimento pode implicar uma deficiência na realocação desse nutriente, uma vez que ele é bastante requerido para a fotossíntese e trocas gasosas, influenciando o comportamento das plantas sob déficit hídrico (MELO et al., 2016), além da formação dos frutos. Estudos realizados por Couch et al. (2017) com aplicação de N em diferentes fases fenológicas de genótipos de gergelim mostraram diferenças na partição e remobilização do N, também ressaltaram a importância da utilização de uma fonte nitrogenada menos solúvel para aumentar a eficiência do uso do N durante o ciclo da cultura.

Para o genótipo BRS Anahi, os tratamentos que foram inoculados com os bacilos não apresentaram diferença mínima significativa quando submetidos a restrição hídrica, apesar disso *B. subtilis* e TABS apresentaram as maiores concentrações de N em folha quando comparados ao manejo nitrogenado. Em relação ao regime hídrico, os tratamentos que passaram pelo estresse

hídrico obtiveram médias mais elevadas quando comparados ao controle. O BRS Seda também apresentou aumento na concentração de N nos tratamentos estressados, no entanto a maior concentração esteve no próprio manejo nitrogenado, contudo, não diferenciando estaticamente dos inoculantes (*B. subtilis*, ESA 13 e ESA 402) e do TABS.

Figura 5 - Acúmulo de nitrogênio em folhas de dois genótipos de gergelim inoculadas com bacilos, sob restrição hídrica, a partir da proteína bruta ($p \leq 0,05$). Testemunha absoluta (TABS). Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; as maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; as letras gregas comparam os genótipos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

5.3 Variáveis fisiológicas

5.3.1 Plantas de gergelim com 8 dias de estresse hídrico

As trocas gasosas apresentaram significância a $p < 0,01$ pelo teste de Tukey na interação tripla para *E* e *EUA* e a $p < 0,05$ para a interação tripla em *Ci*. A interação dupla GEN X RH foi significativa a $p < 0,01$ para *E*, *A*, *EiC*; e significativa a $p < 0,05$ para *Gs*. Para a interação dupla GEN x TRAT as variáveis *Ci*, *E*, *A* e *Eic* foram significativas a $p < 0,01$ e a $p < 0,05$ para *EUA*. Em relação a RH x TRAT, *Ci*, *Gs*, *E*, *A* e *EUA* foram significativos a $p < 0,01$ e *EiC* a $p < 0,05$ (Tabela 4).

Tabela 4 - Resumo da análise de variância para concentração interna de carbono (C_i) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), condutância estomática (G_s) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), fotossíntese (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) a partir da relação (E/C_i), eficiência do uso da água (EUA) a partir da relação entre (A/E).

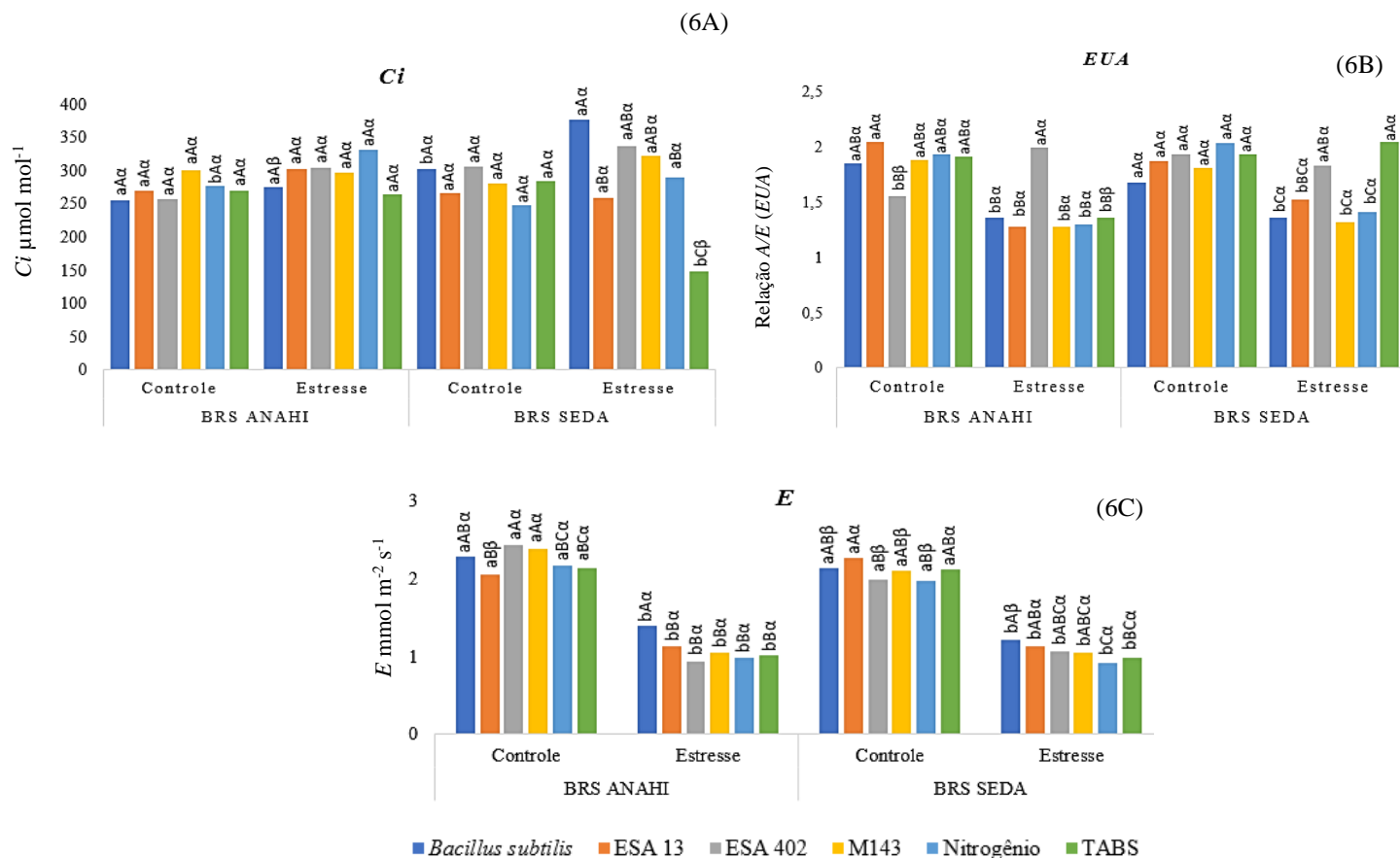
Fontes de Variação	GL	Variáveis					
		C_i	G_s	E	A	E_iC	EUA
Genótipos	1	61,92 ^{ns}	0,0081*	0,2168**	0,1420 ^{ns}	0,00004 ^{ns}	0,1999*
Regime Hídrico	1	7524,00*	1,2685**	36,0494**	164,42**	0,0269**	3,9659**
Tratamentos	5	11202,61**	0,0105**	0,1383**	0,0871 ^{ns}	0,00005 ^{ns}	0,2549**
GEN x RH	1	2075,00 ^{ns}	0,0079*	0,1188**	0,8124**	0,0002**	0,1377 ^{ns}
GEN x TRAT	5	11440,26**	0,0034 ^{ns}	0,0632**	0,3806**	0,0002**	0,1122*
RH x TRAT	5	9928,06**	0,0114**	0,0663**	0,5249**	0,00008*	0,4465**
GEN x RH x TRAT	5	5467,12*	0,0040 ^{ns}	0,0948**	0,0730 ^{ns}	0,00003 ^{ns}	0,2110**
Resíduo	96	1847,03	0,0020	0,0128	0,0765	0,00003	0,0423
CV (%)		15,12	5,51	6,96	11,34	0,76	12,17

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021. (ns – não significativo; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$)

Para o C_i , em ambos os genótipos, observou-se um aumento na condição estresse, com exceção do TABS do BRS Seda (Figura 6A). Suassuna et al. (2017) avaliou diversos genótipos de gergelim sob estresse salino e relatou que médias de C_i abaixo de $200 \mu\text{mol mol}^{-1}$ indica uma baixa atividade fotossintética, uma vez que diminuições na C_i apresentam limitação estomática, prejudicando o desempenho fotossintético, pois quanto maior a abertura estomática, maior a difusão do dióxido de carbono para a câmara subestomática, aumentando a C_i , conseqüentemente favorecendo a fotossíntese. Neste estudo foi observado apenas no TABS do estresse para BRS Seda médias inferiores à indicada acima.

Quando contrastados os dados referentes ao C_i e a E_iC foi possível observar uma baixa eficiência da carboxilação, implicando que o acúmulo de CO_2 presente, especialmente nos tratamentos sob estresse hídrico, não foi transferido para a câmara subestomática onde seria utilizado na incorporação de fotoassimilados resultantes do processo fotossintético.

Figura 6 - Análise da interação tripla para as variáveis Carbono interno (*C_i*) (A), eficiência do uso da água (*EUA*) (B) e transpiração (*E*) (C) no oitavo dia de restrição hídrica para os dois genótipos de gergelim inoculadas com bacilos. Obs.: Letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada genótipo; letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada genótipo; letras gregas comparam os genótipos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

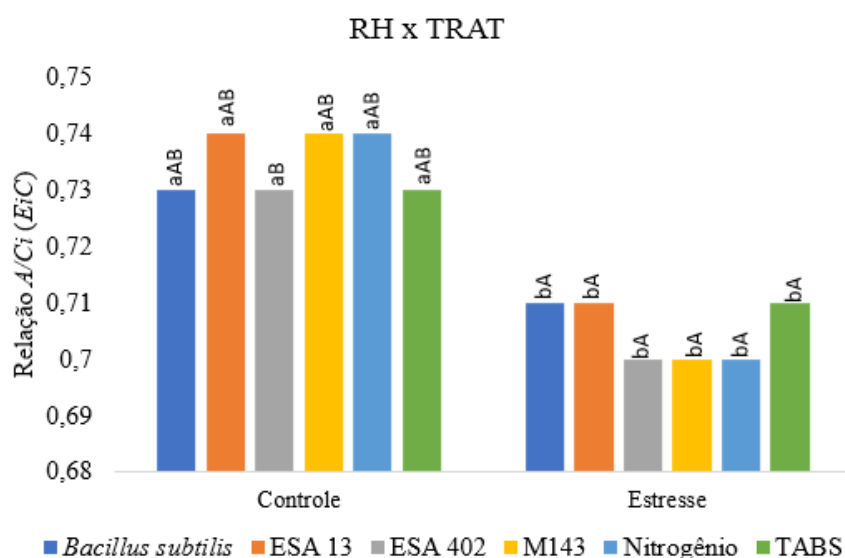
Na *EUA* houve uma redução considerável no genótipo BRS Anahi quando comparado os regimes hídricos, exceto para o tratamento com a estirpe ESA 402 sob estresse hídrico. No genótipo BRS Seda foi possível identificar queda na *EUA* quando comparado os dois regimes hídricos, contudo, o TABS do estresse e a estirpe ESA 402 obtiveram as médias mais elevadas mesmo sob restrição hídrica. Considerações semelhantes foram descritas por Feitosa et al. (2016) ao avaliarem respostas fisiológicas de gergelim sob estresse hídrico e aplicação de ácido salicílico. A estirpe ESA 402 mostrou-se eficiente para manter um padrão mais elevado da *EUA* (Figura 6B).

Em relação a *E*, foi observado que todos os tratamentos reduziram a taxa de transpiração nos dois genótipos, havendo diferença estatística para o regime hídrico (Figura 6C). Na condição estresse, o *B. subtilis* promoveu elevação de *E* nos dois genótipos, porém, sem diferir dos demais

inoculantes bacterianos. A redução da transpiração é proveniente do fechamento estomático, uma vez que plantas sob restrição hídrica ou em altas temperaturas tendem a fechar seus estômatos para não perderem água, como ressaltado por Sousa et al. (2014) e Lacerda et al. (2020) em estudos com plantas de gergelim com reduções das lâminas de irrigação. Ao avaliarem a morfofisiologia de plantas de gergelim sob estresse salino, Silva et al. (2021) retratou uma influência das estratégias adotadas para a E que se assemelham aos resultados encontrados neste estudo.

A EiC (RH x TRAT, $p < 0,05$) apresentou uma redução considerável para todos os tratamentos na condição estresse, contudo, *B. subtilis*, ESA 13 e TABS foram relativamente mais eficientes, no entanto não diferiram estaticamente dos demais tratamentos (Figura 7). A relação entre A/C_i implica na eficiência instantânea de carboxilação (EiC), esta possui estreita conformidade com a concentração intracelular de CO_2 e com a taxa de assimilação de dióxido de carbono, variações na temperatura ótima (entre 20 °C e 30 °C) ou fatores considerados estressantes as plantas, como salinidade e déficit hídrico, podem ocasionar uma restrição no fluxo de CO_2 para o local de carboxilação (SILVA et al., 2018), dificultando assim o metabolismo celular na utilização do substrato para biossíntese celular vegetal.

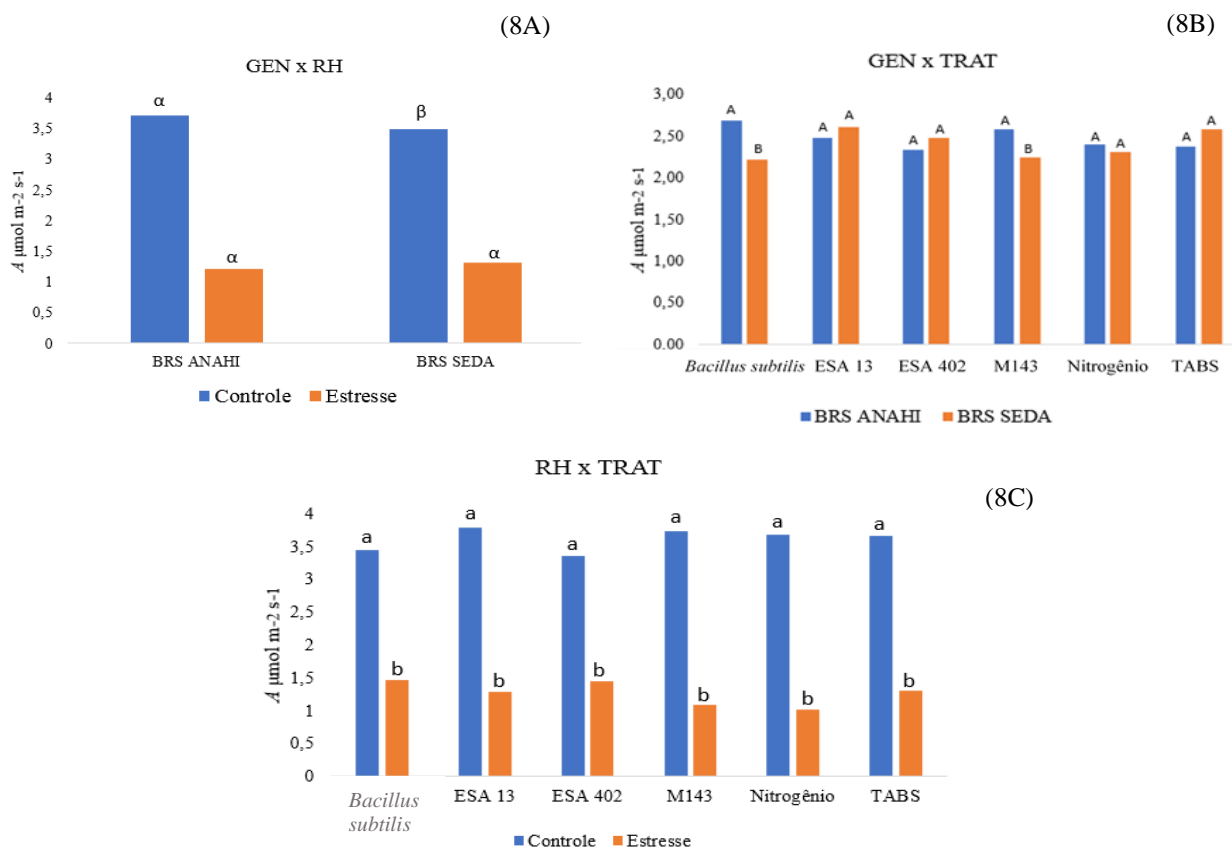
Figura 7 - Relação da A/C_i (EiC) mostrando a interação dupla entre regime hídrico e tratamentos, com nível de significância a $p < 0,05$. Letras minúsculas comparam os regimes hídricos e letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro de cada regime hídrico.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

Como esperado, com a diminuição das demais variáveis a fotossíntese também foi afetada nas plantas que estavam sob restrição hídrica. De acordo com Lopes et al. (2011), a fotossíntese decresce em função do fechamento estomático e da persistência do déficit hídrico (Figura 8). A interação GEN x RH mostrou que os genótipos estavam com mais de 60% de redução da taxa fotossintética, porém, quando comparados não houve diferença significativa na condição estresse entre os genótipos (Figura 8A). Quando comparados o comportamento dos tratamentos na interação GEN x TRAT para BRS Anahi não foi observado diferença estatística significativa dentro do genótipo para os tratamentos e em BRS Seda os tratamentos *B. subtilis* e M143 foram mais sensíveis na interação com o genótipo para A (Figura 8B). Em relação a interação RH x TRAT houve diferença estatística para todos os tratamentos, sendo que *B. subtilis* e ESA 402 apresentaram médias mais significativas para essa interação na condição estresse (Figura 8C).

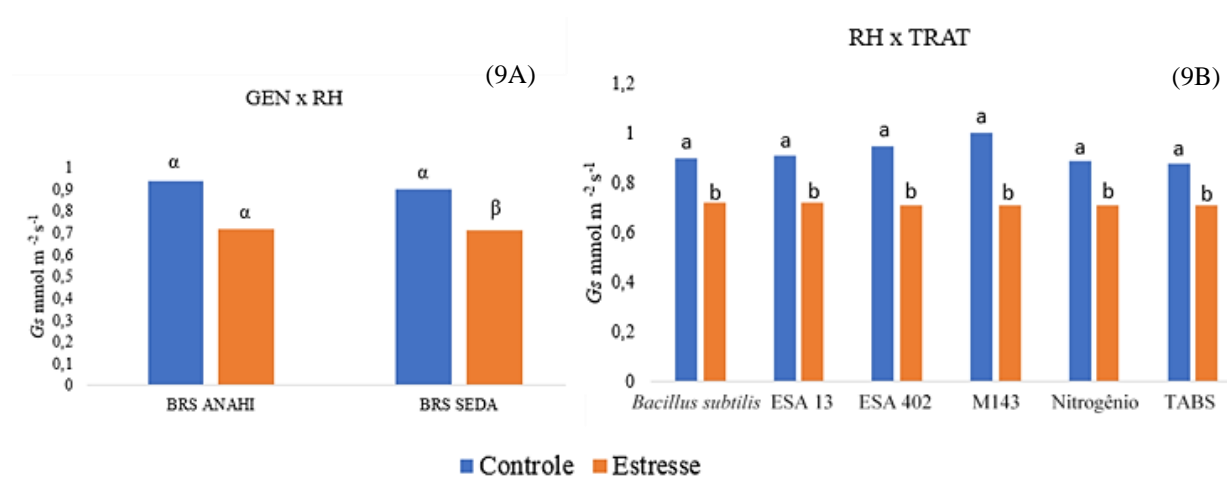
Figura 8 - Interações mostrando o comportamento entre os genótipos (GEN), regime hídrico (RH) e tratamentos (TRAT) com nível de significância a $p < 0,01$. Letras gregas (A) comparam os genótipos nos respectivos regimes hídricos; letras maiúsculas (B) comparam o comportamento dos tratamentos dentro de cada genótipo; e letras minúsculas (C) comparam o regime hídrico dentro de cada tratamento.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

A interação GEN x RH mostrou um comportamento similar para os dois genótipos na condição controle para G_s , e em relação ao estresse hídrico BRS Anahi diferiu estaticamente na condição estresse quando comparado ao BRS Seda (Figura 9). A interação RH x TRAT mostrou diferença significativa entre os tratamentos para G_s , dessa forma o metabolismo fotossintético tem seu funcionamento comprometido pela baixa absorção de CO_2 ou efeito direto do estresse por déficit hídrico (ENDRES et al., 2010).

Figura 9 - Interações mostrando o comportamento entre GEN x RH ($p < 0,05$) e RH x TRAT ($p < 0,01$) para a variável da condutância estomática (G_s). Letras minúsculas comparam regime hídrico dentro de cada tratamento; letras gregas comparam os genótipos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

Na avaliação para a fluorescência (Tabela 5), a fluorescência inicial (F_o) foi significativa a $p < 0,01$ para o fator isolado GEN e RH, para o fator duplo GEN x RH e a $p < 0,05$ para fator isolado TRAT. A fluorescência variável (F_v) foi significativa a $p < 0,01$ para fator isolado RH, para o fator duplo GEN x TRAT e triplo GEN x RH x TRAT. Na fluorescência média (F_m) foi significativo a $p < 0,01$ fator isolado TRAT e duplo GEN x TRAT e a $p < 0,05$ no fator isolado RH. Na relação entre a eficiência quântica potencial (F_v/F_m) foi significativo a $p < 0,01$ apenas para fator isolado GEN e RH.

De acordo com Silva et al. (2011), as plantas uma vez submetidas a estresses abióticos (salinidade, déficit hídrico, estresse térmico, dentre outros) apresentam modificações no estado das membranas, implicando alterações no funcionamento dos tilacóides nos cloroplastos, desencadeando mudanças nas características dos sinais da fluorescência. Apesar das consequências impostas pelos diversos tipos de estresse, o gergelim apresenta uma boa plasticidade fenotípica. Dias et al. (2018) elucidaram resultados significativos para a fluorescência

no comportamento de um genótipo de gergelim (CNPA G3) sob estresse salino, corroborando com os dados deste estudo.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância para fluorescência inicial (*Fo*), fluorescência variável (*Fv*), fluorescência média (*Fm*) e a relação da eficiência quântica potencial entre *Fv/Fm*.

Fontes de Variação	GL	Variáveis			
		<i>Fo</i>	<i>Fv</i>	<i>Fm</i>	<i>Fv/Fm</i>
Genótipos	1	11,8943**	0,2325 ^{ns}	2826,58 ^{ns}	0,0020**
Regime Hídrico	1	111,6827**	198,59**	53290,24*	0,0913**
Tratamentos	5	1,5946*	2,0751 ^{ns}	30410,80**	0,0005 ^{ns}
GEN x RH	1	7,8340**	0,1136 ^{ns}	8174,10 ^{ns}	0,0007 ^{ns}
GEN x TRAT	5	0,7106 ^{ns}	10,4402**	30407,01**	0,0003 ^{ns}
RH x TRAT	5	1,0543 ^{ns}	1,9197 ^{ns}	10346,16 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
GEN x RH x TRAT	5	0,3042 ^{ns}	4,6730**	12835,77 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
Resíduo	96	0,5125	1,0888	87,27	0,0002
CV (%)		3,36	2,76	4,91	2,09

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021. (ns – não significativo; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$)

5.3.2. Plantas de gergelim após reidratação

A análise fisiológica às 48h após a reidratação mostrou um resultado positivo para a interação tripla (GEN x RH x TRAT) nas variáveis *Gs*, *E*, *A*, *EiC* e *EUA* a $p < 0,01$. As interações duplas entre GEN x RH, GEN x TRAT e RH x TRAT foram significativas para a maioria das variáveis analisadas pelo teste de Tukey a $p < 0,01$ e $p < 0,05$ de probabilidade conforme mostrado na tabela 6.

Estes resultados (Tabela 6) mostram uma recuperação positiva dos genótipos frente ao processo de déficit hídrico confirmando-as como semi-tolerantes e acrescenta-se que a interação simbiótica foi positiva entre os inoculantes e os genótipos analisadas para a fisiologia da planta, proporcionando o retorno da ativação de suas atividades fisiológicas essenciais ao crescimento e desenvolvimento.

Tabela 6 - Resumo da análise de variância para concentração interna de carbono (C_i) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), condutância estomática (G_s) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), fotossíntese (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), eficiência instantânea da carboxilação (E_iC) a partir da relação (E/C_i), eficiência do uso da água (EUA) relação entre (A/E) no período de reidratação (48h).

Fontes de Variação	GL	Variáveis					
		C_i	G_s	E	A	E_iC	EUA
Genótipos	1	62,2080 ^{ns}	0,0193**	0,1864*	0,6466**	0,00009 ^{ns}	0,0309 ^{ns}
Regime Hídrico	1	1092,03 ^{ns}	0,2222**	6,6035**	35,0343**	0,0075**	0,6694**
Tratamentos	5	3392,03**	0,0137**	0,4358**	1,6532**	0,0005**	0,0385 ^{ns}
GEN x RH	1	5424,38*	0,0137**	0,3368**	0,2859 ^{ns}	0,0002*	0,6332**
GEN x TRAT	5	3666,34**	0,0121**	0,4528**	1,1350**	0,0003**	0,2159**
RH x TRAT	5	5387,65**	0,0102**	0,1662**	0,5866**	0,0002**	0,3649**
GEN x RH x TRAT	5	1240,36 ^{ns}	0,0091**	0,2289**	0,8258**	0,0003**	0,4494**
Resíduo	96	957,61	0,0008	0,0272	0,875	0,00005	0,0327
CV (%)		12,52	3,57	9,12	10,22	0,96	9,81

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021. (ns – não significativo; ** $p \leq 0,01$; * $p \leq 0,05$)

Após o 6º dia de reidratação, os tratamentos da condição controle do genótipo BRS Anahi não exibiram diferença significativa para C_i , porém, quando inoculada com a estirpe ESA 402 apresentou diferença significativa; já na condição estresse, as estirpes ESA 13 e ESA 402 apresentaram uma maior C_i . O genótipo BRS Seda apresentou, no estresse, diferença significativa para a estirpe M143 e para o manejo nitrogenado (Figura 10A).

De acordo com Taiz e Zeiger (2017), a concentração interna de CO_2 está intimamente associada à produtividade das plantas e a combinação adequada de luz e ausência de estresse podem proporcionar taxas fotossintéticas mais elevadas. Apesar da condição de estresse hídrico que os genótipos BRS Anahi e BRS Seda foram submetidos, foi possível observar uma elevada concentração de CO_2 , sugerindo um efeito positivo dos inoculantes na mitigação dos efeitos do estresse hídrico sobre plantas de gergelim.

Com relação a taxa de transpiração (Figura 10B), observou-se recuperação do genótipo BRS Anahi com os tratamentos *B. subtilis*, ESA 13, e TABS, sendo o *B. subtilis* o tratamento mais favorável. No genótipo BRS Seda, os tratamentos com inoculantes a base de *B. subtilis*, ESA 13 e ESA 402 apresentaram médias superiores ao controle para taxa de transpiração.

Em trabalho conduzido por Feitosa et al. (2016) com gergelim sob déficit hídrico utilizando ácido salicílico como agente atenuador, não se observou recuperação da taxa transpiratória em

patamares similares ao controle. As estirpes *B. subtilis*, ESA 13 e ESA 402 quando associadas aos genótipos de gergelim deste estudo firmaram uma interação positiva para esta variável com taxas transpiratórias superiores ao controle.

Para a condutância estomática (Figura 10C) foi observada recuperação acelerada, as plantas que foram irrigadas diariamente apresentaram valores melhores para G_s , contudo, as que estavam sob restrição hídrica apresentaram valores iguais ou superiores posteriormente a reidratação.

A condição de baixa umidade e alta temperatura, segundo Chaves et al. (2010), afetam a condutância estomática, ocasionando perdas excessivas de água pela transpiração, por conseguinte ocorre o fechamento estomático, comprometendo a difusão do CO_2 para o mesófilo celular.

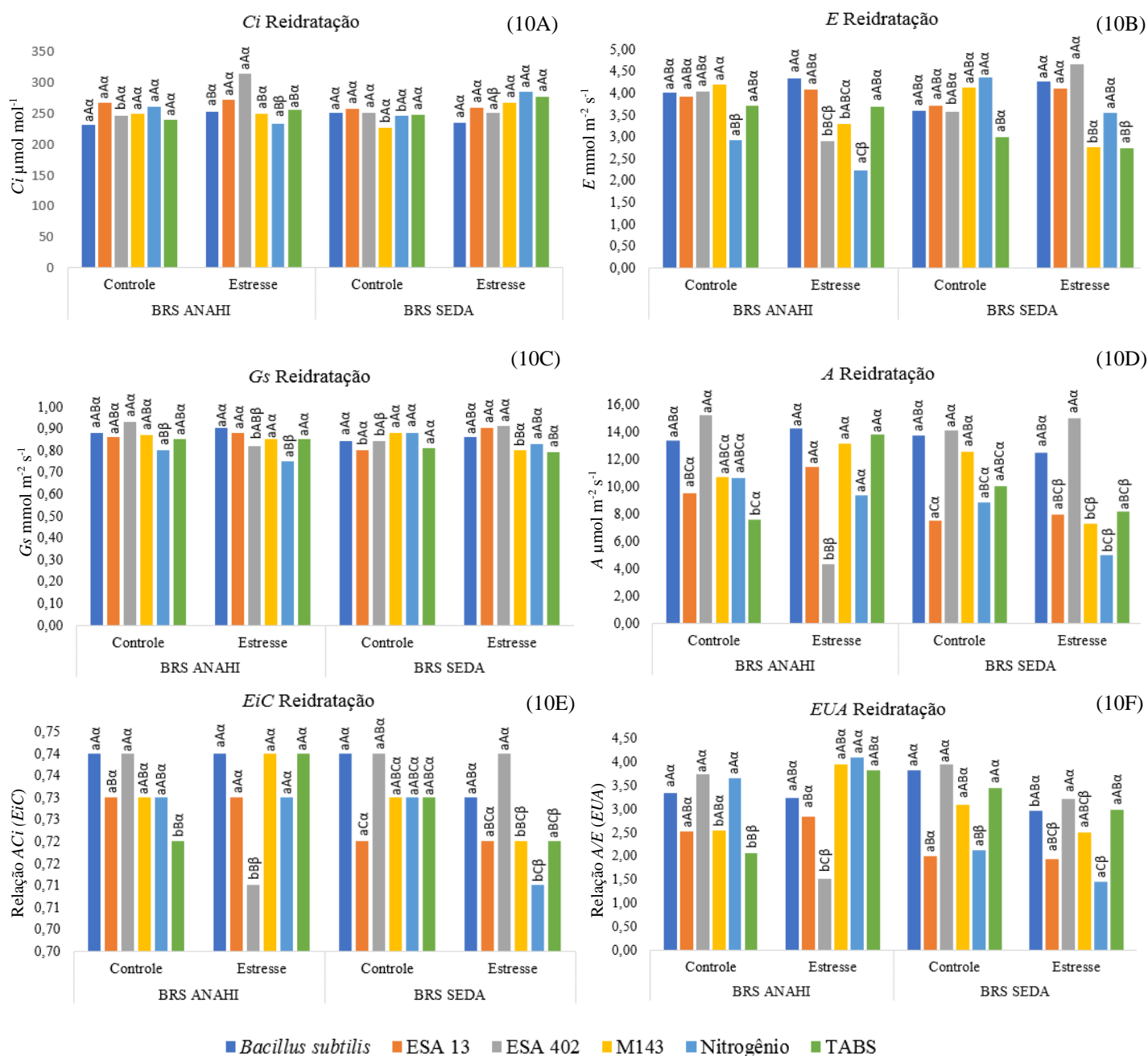
A transpiração está ligada a fotossíntese que inevitavelmente está ligada ao CO_2 , o que justifica a queda na taxa fotossintética no decorrer do estresse sobre as plantas nesse estudo. Após a reidratação foi observado um efeito positivo na recuperação da taxa fotossintética no genótipo BRS Anahi quando inoculado com *B. subtilis*, ESA 13, M143 e no TABS; o tratamento com ESA 402 não teve efeito positivo na recuperação da fotossíntese. Já no genótipo BRS Seda, o tratamento com ESA 402 apresentou uma média fotossintética bastante elevada, seguida pelo tratamento com *B. subtilis*, ambas na condição estresse (Figura 10D).

Trabalhos realizados por Souza (2012) com plantas de café e por Feitosa et al. (2016) com plantas de gergelim mostraram um déficit na recuperação da taxa fotossintética, no entanto, os achados neste trabalho apontaram um indício positivo em relação a recuperação da fotossíntese para os tratamentos inoculados com os bacilos.

O comportamento da EiC (Figura 10E) e da EUA (Figura 10F) foi bastante semelhante no processo de recuperação após a reidratação, assim também se mostrou muito concatenado a fotossíntese. Pereira et al. (2017) afirmaram que o gergelim apresenta um condicionamento morfofisiológico eficiente no uso da água, especialmente em déficit hídrico.

Sob estresse hídrico as plantas tendem a aumentar sua EiC e EUA para garantir a sua sobrevivência e a produtividade. Com isso, houve efeito positivo da interação simbiótica dos bacilos com os genótipos BRS Anahi e BRS Seda para as variáveis EiC e EUA , sendo *B. subtilis*, ESA 13 e M143 mais eficientes no genótipo BRS Anahi e do *B. subtilis* e ESA 402 para o genótipo BRS Seda, ambos após recuperação do estresse hídrico.

Figura 10 - Comportamento fisiológico dos genótipos BRS Anahi e BRS Seda, inoculadas com estirpes de bacilos e submetidas a estresse hídrico, 6º dia após reidratação. Letras gregas comparam os genótipos nos respectivos regimes hídricos; letras maiúsculas comparam o comportamento dos tratamentos dentro de cada genótipo; e letras minúsculas comparam o regime hídrico dentro de cada tratamento.



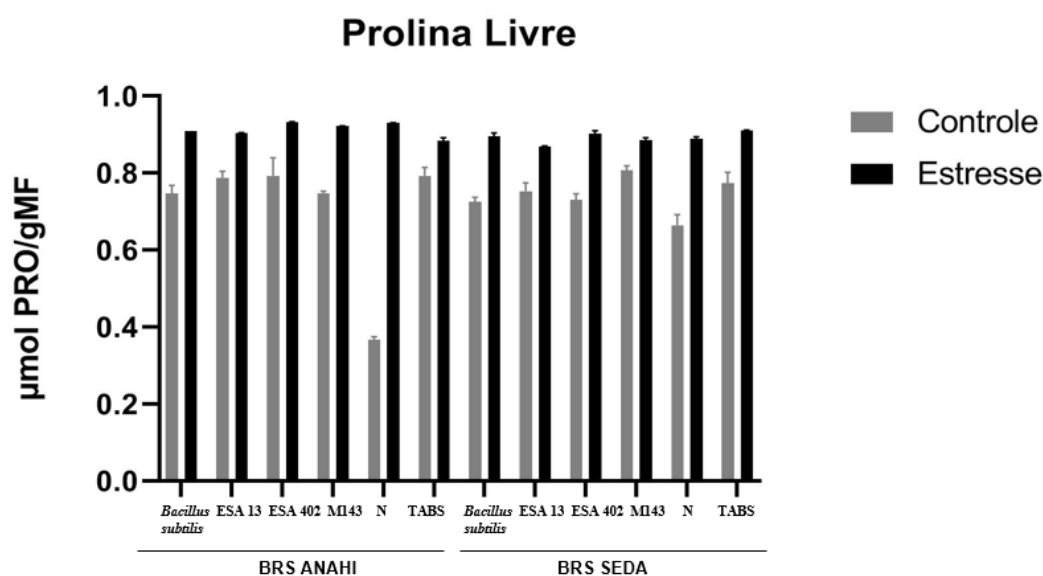
Fonte: Giliard Bruno, 2021.

5.4 Variáveis bioquímicas

5.4.1 Prolina livre total

A análise bioquímica para prolina livre total nos tecidos mostrou um aumento significativo em todos os tratamentos com nível de significância a $p \leq 0,01$ para interação tripla (Figura 11). A prolina, de acordo com Dias et al. (2014) é capaz de desempenhar um papel osmorregulador, ligando-se ao O_2 e radicais livres produzidos sob estresse hídrico, sendo assim, a sua atuação na indução de resistência sistêmica nas plantas torna-se um complexo atenuante dos efeitos negativos desencadeados pelo déficit hídrico.

Figura 11 - Concentração de prolina livre em dois genótipos de gergelim inoculados com bacilos e submetidos a estresse hídrico comparando-se ao controle, com seus respectivos tratamentos significativos a $p \leq 0,01$.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

A maior concentração de prolina para o genótipo BRS Anahi foi observada na condição estresse no tratamento inoculado com a estirpe ESA 402, no entanto, não diferiu estaticamente dos demais tratamentos, exceto da TABS que apresentou uma menor concentração. Analogamente, o BRS Seda a maior concentração de prolina foi observada na TABS sob estresse hídrico seguido da estirpe ESA 402; a estirpe ESA 13 obteve a menor concentração de prolina diferindo estaticamente da TABS. Tendo em vista o aumento na concentração deste soluto osmoprotetor nas plantas de gergelim em deficiência hídrica, é possível afirmar que apesar da condição limitante

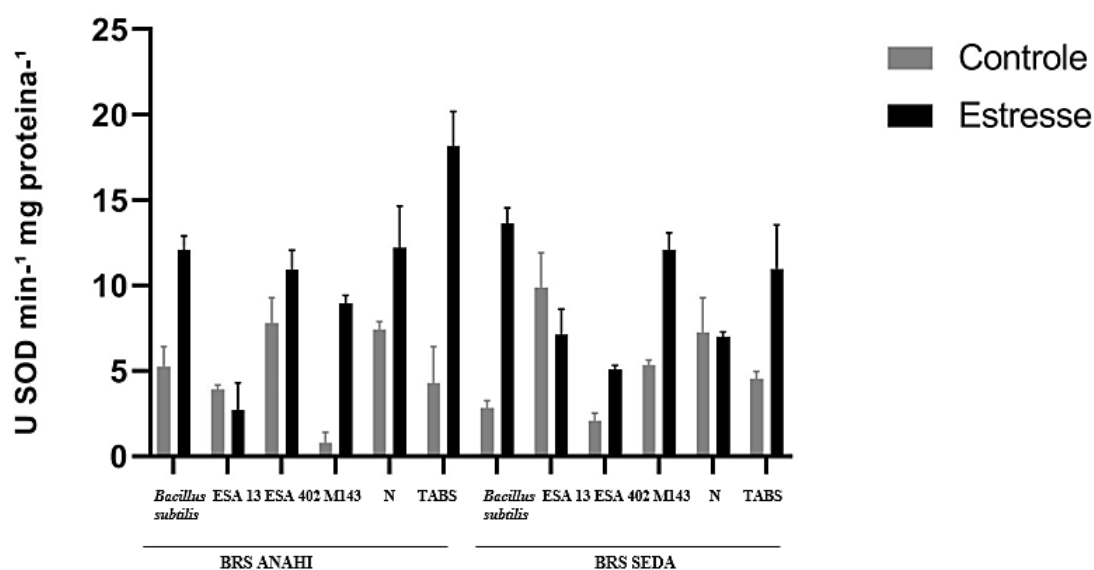
imposta, os genótipos foram capazes de sintetizar este soluto de maneira satisfatória, observando-se as maiores concentrações no BRS Anahi nos tratamentos inoculados e no manejo nitrogenado.

A osmorregulação em plantas sob baixo potencial hídrico depende da síntese e do acúmulo de osmoprotetores ou osmólitos, como proteínas solúveis, açúcares e álcoois de açúcar, compostos de amônio quaternário e aminoácidos, como a prolina. A síntese e o acúmulo de solutos celulares compatíveis auxiliam as plantas sob condições de déficit hídrico, este processo é denominado ajuste osmótico (BLUM, 2017). De acordo com Fang e Xiong (2015) os osmoprotetores são constituídos de vários íons inorgânicos e solutos orgânicos que atuam no potencial osmótico celular e aumentam a eficiência no uso da água.

5.4.2 Atividade Superóxido Dismutase (SOD)

As fontes de variação foram significativas a $\leq 0,01$, exceto para os genótipos que não foram significativos nem a $p \leq 0,01$ ou $p \leq 0,05$ de probabilidade. A análise bioquímica da atividade da SOD indicou uma concentração mais alta para os tratamentos sob o estresse hídrico, implicando um ajustamento das plantas ao déficit hídrico (Figura 12). No entanto, o tratamento com a estirpe ESA 13 associada aos genótipos BRS Anahi e BRS Seda não obteve o mesmo perfil, sendo a biosíntese enzimática da SOD mais baixa que o controle.

Figura 12. Concentração da superóxido dismutase (SOD) em função do déficit hídrico comparando a interação dos genótipos de gergelim tratadas com inoculantes a base de bacilos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

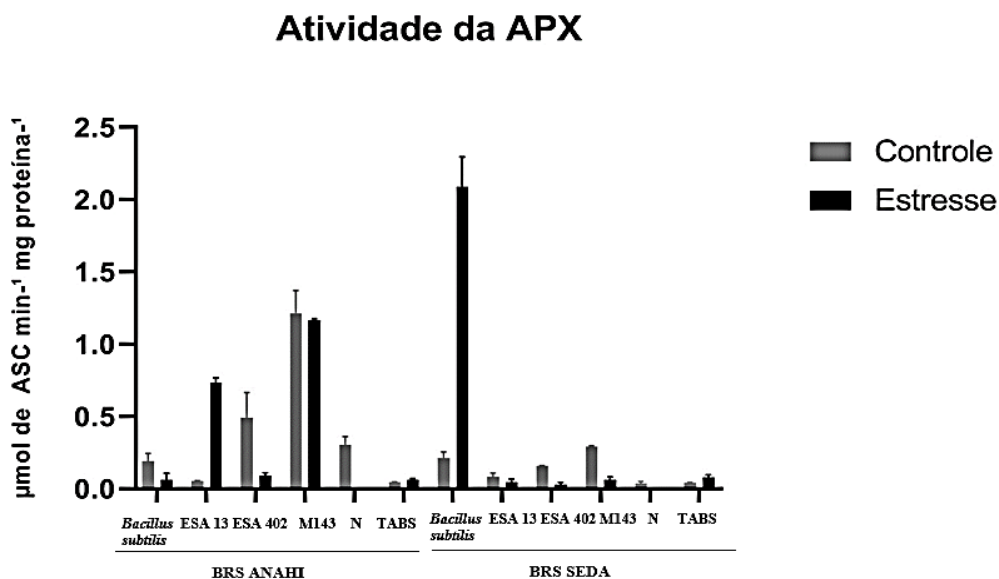
A maior concentração da enzima foi observada no BRS Anahi para a TABS. Corroborando com este resultado, Gholinezhad et al. (2020) observaram o mesmo comportamento em gergelim associado a inoculação micorrízica com restrição hídrica. No BRS Seda a menor concentração esteve na associação do genótipo com o tratamento inoculado com a estirpe ESA 402 e maior concentração para a estirpe *B. subtilis*, ambas na condição estresse.

A SOD como enzima antioxidante é considerada a primeira linha de defesa da célula vegetal, na presença de EROs a enzima atua dismutando o $O_2^{\bullet-}$ em H_2O_2 , interferindo na concentração das EROs e na formação de radicais $\bullet OH$ (GUPTA et al., 2018), o acúmulo desses radicais livres danifica o arranjo celular causando peroxidação lipídica ocasionando o extravasamento celular, desnaturação proteica e carboidratos (MANIVANNAN et al., 2008).

5.4.3 Atividade Ascorbato Peroxidase (APX)

Os resultados para análise bioquímica da APX foram significativos a $p \leq 0,01$ (Figura 13), a maior concentração foi observada no genótipo BRS Seda com o tratamento inoculado com *B. subtilis* em déficit hídrico e os demais tratamentos em associação com o genótipo não obtiveram concentrações semelhantes. Para BRS Anahi o tratamento com a estirpe ESA 13 mostrou uma concentração de APX superior ao controle; a estirpe M143 apesar de apresentar uma concentração relativamente alta da enzima na condição estresse não foi superior ao controle.

Figura 13. Concentração da ascorbato peroxidase (APX) em função do déficit hídrico, comparando a interação dos genótipos de gergelim tratadas com inoculantes a base de bacilos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

A atividade funcional da APX é complementar na defesa da planta, sua queda biossintética observada na maioria dos tratamentos deste estudo, pode estar ligada ao aumento na atividade da primeira linha de defesa enzimática, nesse caso a SOD. Sendo assim, é possível supor que os genótipos conseguiram realizar um ajustamento morfofisiológico aclimatando-se ao déficit hídrico.

De acordo com Carneiro et al. (2011) as enzimas APX, CAT e polifenoloxidase são antioxidantes responsáveis pela defesa primária contra radicais livres, quebrando H_2O_2 em H_2O e oxigênio, com isso promovem a desintoxicação causada pelas EROs que ocasionam danos e comprometem o funcionamento das células vegetais.

Considerando que o estresse abiótico pode interferir nas atividades enzimáticas, Sousa et al. (2015) mostraram a redução da atividade da APX e da polifeniloxidase em feijão caupi sob estresse hídrico. O mesmo comportamento foi observado no presente trabalho implicando que o estresse por déficit hídrico afetou negativamente os genótipos, contudo, a inoculação com *B. subtilis*, M143 e ESA 13 mostrou-se eficaz na indução da biossíntese enzimática a APX.

5.4.4 Atividade Catalase (CAT)

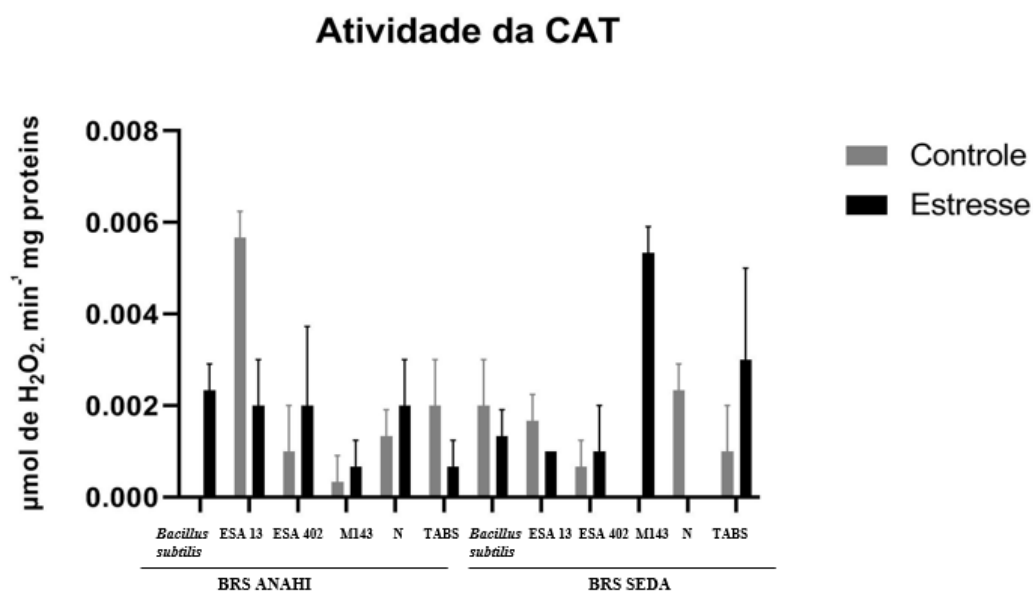
A resposta bioquímica da CAT foi significativa para a interação tripla a $p \leq 0,01$. Essa enzima faz parte do complexo enzimático antioxidante de defesa das plantas que são submetidas a estresses abióticos, como o estresse hídrico. Kadkhodaie et al. (2013) ao avaliarem vários genótipos de gergelim sensíveis, intermediários e resistentes ao déficit hídrico, classificaram a CAT como uma das principais enzimas que atua na eliminação do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) gerado na fotorrespiração e β -oxidação de ácidos graxos.

Na interação entre os genótipos e os inoculantes (Figura 14), para BRS Anahi a estirpe *B. subtilis*, ESA 402 e M143 apresentaram uma maior concentração da CAT na condição estresse, ressaltando-se que no manejo nitrogenado também foi mais alta essa concentração. Para o genótipo BRS Seda, a interação entre o genótipo e o inoculante, os que demonstraram maiores concentrações da CAT foram as estirpes ESA 402 e M143, em contrapartida no tratamento controle absoluto (TABS) foi observado uma alta concentração da enzima.

Como pode ser observado na figura 13, a atuação da enzima variou de acordo com a intensidade do estresse, contudo, é possível afirmar que os inoculantes compostos especialmente pelas estirpes *B. subtilis*, ESA 402 (BRS Anahi) e ESA 402 e M143 (BRS Seda) induziram a biossíntese da enzima auxiliando na atenuação dos efeitos oxidativos desencadeados pelo déficit hídrico beneficiando os genótipos. Resultados descritos por Gholinezhad et al. (2020) relataram

um aumento na atividade da catalase em gergelim, sob condições de estresse severo, inoculado com *F. mosseae* e *R. irregularis* de 33% e 11%, respectivamente.

Figura 14 - Concentração da catalase (CAT) em função do déficit hídrico comparando a interação dos genótipos de gergelim tratadas com inoculantes a base de bacilos.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

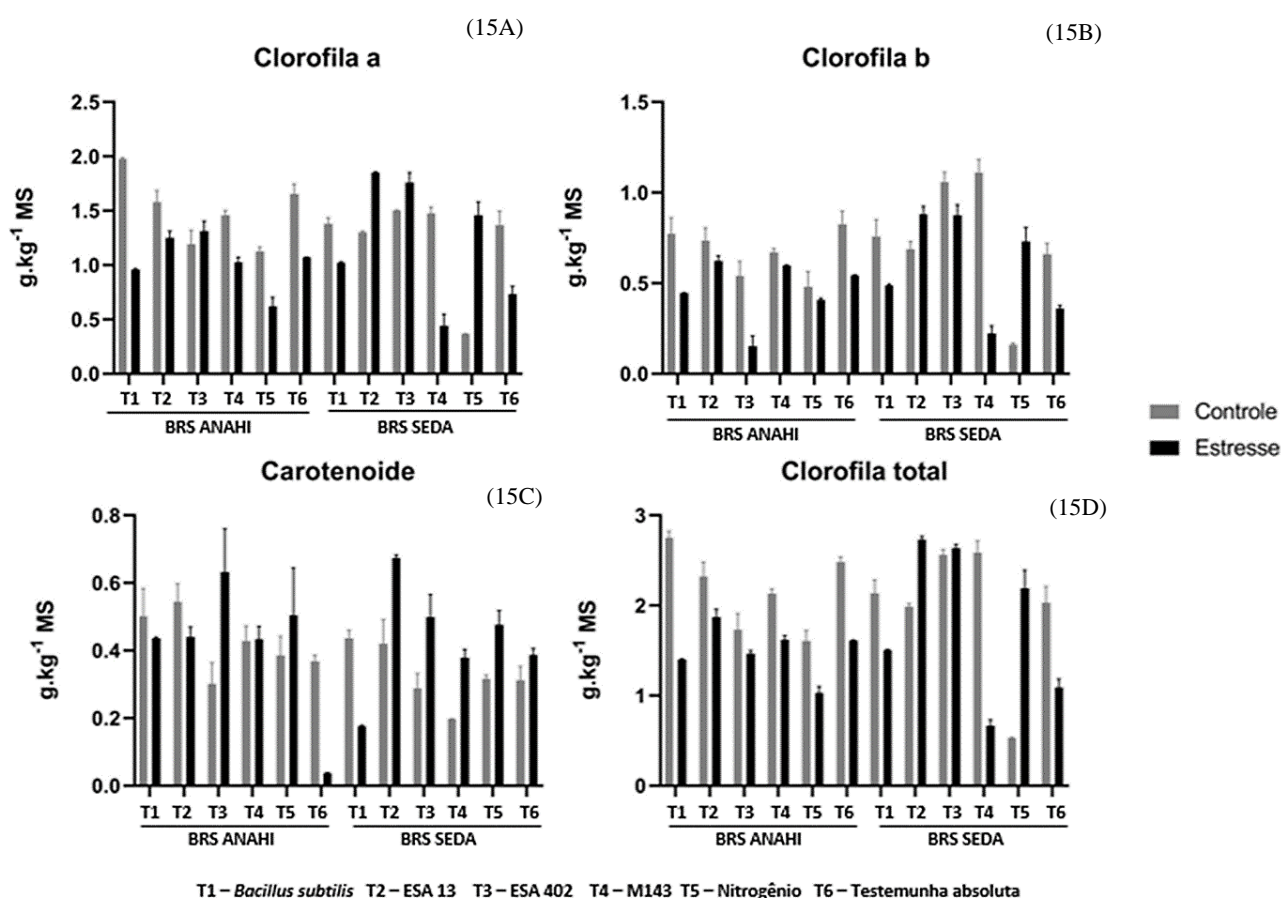
5.4.5 Pigmentos fotossintetizantes

A análise de pigmentos fotossintetizantes (Figura 15) mostrou-se significativa para a Clorofila *a*, *b*, total e carotenoides. Para as variáveis clorofila *a* e carotenoides, as fontes de variação foram significativas a $p \leq 0,01$ pelo teste de variância. Na clorofila *b* a interação dupla Genótipo x Regime Hídrico foi significativa a $p \leq 0,05$ e as demais fontes a $p \leq 0,01$. A clorofila total apresentou significância a $p \leq 0,05$ para fator isolado Genótipo e $p \leq 0,01$ para as outras fontes de variação.

OS genótipos, apesar da restrição hídrica, mostraram uma interação positiva aumentando a concentração de clorofila *a* nos tratamentos inoculados com as estirpes ESA 402 para BRS Anahi e ESA 13 e ESA 402 para BRS Seda (Figura 15A). Na avaliação da clorofila *b* foi observado um aumento superior ao controle na associação do BRS Seda com a estirpe ESA 13 (Figura 15B) e para a clorofila total as estirpes ESA 13 e ESA 402 foram mais eficientes na biossíntese dos pigmentos apresentando valores superiores ao controle (Figura 15D). Os

tratamentos inoculados com ESA 13 e M143 promoveram um aumento nos carotenoides no BRS Anahi e com ESA 13, ESA 420 e M143 em BRS Seda, sendo superiores ao controle (Figura 15C).

Figura 15 - Análise de pigmentos fotossintéticos clorofila *a* (15A), *b* (15B), carotenoide (15C) e clorofila total (15D) em plantas de gergelim inoculadas com bacilos e sob condição de déficit hídrico.



Fonte: Giliard Bruno, 2021.

Gholinezhad et al. (2020) observaram a diminuição dos níveis de clorofilas *a* e *b* com o aumento do estresse hídrico reduzindo em 60% e 26%, respectivamente, em comparação as plantas em irrigação ótima. Os autores ressaltaram o aumento dos carotenoides e afirmaram uma melhora nos tratamentos inoculados.

Os tratamentos fertilizados com o manejo nitrogenado apresentaram valores superiores ao controle para BRS Seda na clorofila *a*, *b*, total e carotenoides e BRS Anahi para a variável carotenoides. Esse comportamento pode estar ligado ao fato do nitrogênio ser um componente

essencial da estrutura química dos pigmentos, sendo assim a fertilização com esse nutriente viabiliza a síntese de compostos fotossintetizantes.

Estudos realizados por Anaya et al. (2018) afirmaram que o estresse hídrico geralmente resulta na destruição dos cloroplastos e consequentemente na diminuição da clorofila além da atividade das enzimas no ciclo de Calvin durante o processo da fotossíntese. Varamin et al. (2020) verificaram resultados positivos em genótipos de gergelim tratados com quitosana para os pigmentos fotossintéticos, assim como para as enzimas antioxidantes e a produção de sementes.

Os resultados deste trabalho mostraram-se promissores em relação aos objetivos propostos e podem ser utilizados como base para nortear outros estudos em campo, sabendo-se previamente do comportamento dos genótipos de gergelim (BRS Anahi e BRS Seda) em relação a inoculação com os bacilos sob restrição hídrica. O resumo das principais variáveis fisiológicas e bioquímicas está descrito na tabela 7.

Tabela 7 - Resumo do comportamento das principais variáveis fisiológicas e bioquímicas analisadas na interação entre os dois genótipos de gergelim e os inoculantes a base de bacilos submetidos a restrição hídrica e comparados ao controle testados a $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey.

	<i>Ci</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>gs</i>	Prolina	SOD	APX	CAT
BRS ANAHI								
<i>B. subtilis</i>	^	v	v	v	^	^	v	^
ESA 13	^	v	v	v	^	v	^	v
ESA 402	^	v	v	v	^	^	v	^
M143	^	v	v	v	^	^	v	^
Nitrogênio	^	v	v	v	^	^	v	^
TABS	v	v	v	v	^	^	^	v
BRS SEDA								
<i>B. subtilis</i>	^	v	v	v	^	^	^	v
ESA 13	v	v	v	v	^	v	v	v
ESA 402	^	v	v	v	^	^	v	^
M143	^	v	v	v	^	^	v	^
Nitrogênio	^	v	v	v	^	v	v	v
TABS	v	v	v	v	^	^	^	^

Fonte: Elaborada pelo autor, 2021. (^ - teor aumentado; v - teor reduzido)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os genótipos BRS Anahi e BRS Seda foram semi-tolerantes ao déficit hídrico, uma vez que foi possível observar um ajustamento morfofisiológico e bioquímico, sendo a inoculação com estirpes um fator relevante para os resultados obtidos. Ressalta-se que na recuperação das plantas após a reidratação, as interações *B. subtilis* x BRS Anahi e ESA 402 x BRS Seda demonstraram médias superiores ao controle para as variáveis fisiológicas, sendo assim eficientes no processo de recuperação dos genótipos em estudo.

Na linha de defesa contra as EROS, a SOD foi a enzima que mais respondeu em vários tratamentos com inoculantes e o teor de prolina livre total aumentou em todos os tratamentos sob estresse hídrico.

Os tratamentos inoculados com ESA 13, ESA 402, M143 e o manejo nitrogenado favoreceram o aumento dos pigmentos fotossintéticos nos genótipos durante o estresse hídrico.

Considerando a produção final, a estirpe ESA 13 estabeleceu uma melhor interação com o genótipo BRS Anahi e a ESA 402 com BRS Seda, com incremento de 49% e 34%, respectivamente, para o peso de mil sementes, quando comparado ao tratamento com nitrogênio, sob déficit hídrico. Comparando a produção final dos dois genótipos, o genótipo BRS Anahi foi o mais responsivo em condições do déficit hídrico.

REFERÊNCIAS

ALCANTARA, R.M.; XAVIER, G.R.; RUMJANEK, N.G.; ROCHA, M.M.; CARVALHO, J.S. Eficiência simbiótica de progenitores de cultivares brasileiras de feijão-caupi. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 1-9, 2014.

ALSCHER, R.G.; ERTURK, N.; HEATH, L.S. Role of superoxide dismutase (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**. v. 53, n. 372, p. 1331-1241, 2002.

ANAYA, F.; FGHIRE, R.; WAHBI, S.; LOUTFI, K. Influence of salicylic acid on seed germination of *Vicia faba* L. under salt stress. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Science**. v. 17(1), p. 1-8, 2018.

ANILAKUMAR, K.R.; PAL, A.; KHANUM, F.; BAWA, A.M. Nutritional, medicinal and industrial uses of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds—an overview. **Agriculturae Conspectus Scientificus**. v. 75(4), p. 677–685, 2010.

ARAÚJO, F.F.; BRAGANTE, R.J.; BRAGANTE, C.E. Controle genético, químico e biológico de *meloidoginose* na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia-GO. v. 42, n. 2, 2012.

ARAÚJO, F.F.; HUNGRIA, M. Nodulação e rendimento de soja co-infectada com *Bacillus subtilis* e *Bradyrhizobium japonicum* / *Bradyrhizobium elkanii*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 9, p. 1633-1643, 1999. Disponível em:<encurtador.com.br/bnvHJ>. Acesso em: 14 de out de 2019.

AGURLA, S.; GAHIR, S.; MUNEMASA, S.; MURATA, Y.; RAGHAVENDRA, A.S. Mechanism of stomatal closure in plants exposed to drought and cold stress. **Advances in Experimental Medicine and Biology**. v. 1081, p. 215-232, 2018. Disponível em:<<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30288712/>>. Acesso em: 05 de jul de 2020.

ARRIEL, N.H.C.; FIRMINO, P.T.; BELTRÃO, N.E.M.; SOARES, J.J.; ARAÚJO, A.E.; SILVA, A.C.; FERREIRA, G.B. A cultura do gergelim. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**, 72p. (Cartilha Plantar, 50), 2006.

ARRIEL, N.H.C. Informações técnicas: Gergelim (*Sesamum indicum* L.). **Embrapa Algodão**, Campina Grande, Paraíba. p. 22, 2019.

ARRIEL, N.H.C.; BELTRÃO, E.M.N. Cultivo do gergelim. Sistema de Produção, **Embrapa Algodão**. ISSN 1678-8710 6. Versão Eletrônica 2ª edição, 2014.

ASKARI, A.; ARDAKANI, M.R.; PAKNEJAD, F.; HOSSEINI, Y. Effects of mycorrhizal symbiosis and seed priming on yield and water use efficiency of sesame under drought stress condition. **Scientia Horticulturae**. v. 257, p. 17, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science> >. Acesso em: 23 de set 2019.

BACKER, R.; ROKEM, J.S.; ILANGUMARAN, G.; LAMONT, J.; PRASLICKOVA, D.; RICCI, E.; SUBRAMANIAN, S.; SMITH, D.L. Plant growth-promoting rhizobacteria: context,

mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**. v. 9, p. 1473, 2018.

BARBOSA, D.D.; BRITO, S.L.; FERNANDES JUNIOR, P.I.; FERNANDES, P.D.; LIMA, L. M. Can *Bradyrhizobium* strains inoculation reduce water deficit effects on peanuts? **World Journal of Microbiology & Biotechnology**. v. 34, p. 1-11, 2018.

BATES, L.; WALDREN, R.P.; TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.

BELTRÃO, N.E.M.; VIEIRA, D.J. O agronegócio do gergelim no Brasil. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica**. v. 17, p. 348, 2001.

BELTRÃO, N.E.M.; OLIVEIRA, M.I.P. Ecofisiologia das culturas de algodão, amendoim, gergelim, mamona, pinhão-manso e sisal. **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília-DF. p. 163-194, 2011.

BERG, G.; RYBAKOVA, D.; GRUBE, M.; KOBERL, M. The plant microbiome explored: implications for experimental botany. **Journal of Experimental Botany**. v.67, p. 995-1002, 2016.

BETTIOL, W.; KIMATI, H. Efeito de *Bacillus subtilis* sobre *Pyricularia oryzae* agente causal de brusone do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v. 25, n. 8, p. 1165-1174, 1990.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L.P. Análises químicas e bioquímicas em plantas. **Imprensa Universitária da UFRPE**. p. 261, 2011.

BLUM, A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant Cell Environ**. v. 40(1), p. 4-10, 2017.

BRADFORD, M.M. **A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding**. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/942051>>. Acesso em 23 de out 2019.

BREUSEGEM, F.V.; VRANOVÁ, E.; DAT, J.F.; INZÉ, D. The role of active oxygen species in plant signal transduction. **Plant Science**. v. 161, p. 405-414, 2001.

BRITO, S. L.; SANTOS, A. B.; BARBOSA, D. D.; FERNANDES, P. D.; FERNANDES JUNIOR, P. I.; LIMA, L. M. *Bradyrhizobium* spp. as attenuators of water deficit stress in runner peanut genotypes based on physiological and gene expression responses. **Genetics and Molecular Research**, v. 18, p. 1-12, 2019.

CAMPOS, L.N.; GUILHERME, M.F.S.; OLIVEIRA, H.M.; COSTA, V.F.; SILVA, E. Avaliação biométrica de sementes de *Sesamum indicum* L. In: Congresso Nordeste de Biólogos, 4, 2014, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: CONGREBIO, p.145-147, 2014.

CARNEIRO, M.M.C.; DEUNER, S.; OLIVEIRA, P.V.; TEIXEIRA, S.B.; SOUSA, C.P.; BACARIN, M.A.; MORAES, D.M. Atividade antioxidante e viabilidade de sementes de girassol após estresse hídrico e salino. **Revista Brasileira de Sementes**. v. 33, n.4, p. 752-761, 2011.

CAZORLA, F.M.; ROMERO, D.; PÉREZ-GARCÍA, A.; LUGTENBERG, B.J.; VICENTE, A.D.; BLOEMBERG, G. Isolation and characterization of antagonistic *Bacillus subtilis* strains from the avocado rhizoplane displaying biocontrol activity. **Journal of Applied Microbiology**. v. 103(5), p. 9-1950, 2007. Disponível em: < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17953605>>. Acesso em: 15 de out de 2019.

CHAVES, M.M.; ZARROUK, O.; FRANCISCO, R.; COSTA, J.M.; SANTOS, T.; REGALADO, A.P.; RODRIGUES, M.L.; LOPES, C.M. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. **Annals of Botany**, Oxford, v. 105, n. 5, p. 661-676, 2010.

CHENG, F.C.; JINN, T.R.; HOU, R.C.; TZEN, J. T. Neuroprotective effects of sesamin and sesamol in gerbil brain in cerebral Ischemia. **Journal of Biomedical Science**. v. 2(3), p. 284–288, 2006.

CHU, Z.; XIAOCHUANG C.; JIJIE H.; LIANFENG Z.; JUNHUA Z.; JIANLIANG H.; QIANYU J. Nitrogen metabolism in adaptation of photosynthesis to water stress in rice grown under different nitrogen levels. **Front Plant Science**. v. 8, p. 1079, 2017. Disponível em: < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28690622/> >. Acesso em: 04 jul. 2020.

COELHO, A.P.; LEAL, F.P.; FILLA, V.A.; DALRI, A.B.; FARIA, R.T. Estimativa da produtividade de grãos da aveia-branca cultivada sob níveis de irrigação utilizando clorofilômetro portátil. **Revista da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**. v. 9, n. 2, p. 662-667, 2018.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: segundo levantamento da safra 2020/2021, agosto, 2021**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 11 de ago. de 2021.

CORRÊA, M.J P.; SANTOS, R.A.; FERNANDES, V.L.; ALMEIDA, F.C.G. Exportação de nutrientes pela colheita do gergelim (*Sesamum indicum* L.). **Ciência Agrônômica**, v. 26, n. 1-2, p. 27-29, 1995.

COUCH, A.; JANI, A.; MULVANY, M.; HOCHMUTHA, G.; BENNETT, J.; GLOAGUEN, R.; LANGHAM, R.; ROWLAND, D. Nitrogen accumulation, partitioning, and remobilization by diverse sesame cultivars in the humid southeastern USA. **Elsevier, Field Crops Research**. v. 203, p. 55-64, 2017.

DIAS, M.C.; OLIVEIRA, H.; COSTA, A.; SANTOS, C. Improving elms performance under drought stress: the retreatment with abscisic acid. **Environmental and Experimental Botany**. v. 100, p. 64–73, 2014.

DIAS, A.S.; LIMA, G.S.L.; GHEYI, H.R.; NOBRE, R.G.; FERNANDES, P.D.; SILVA, F.A.S. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica do gergelim sob estresse salino e adubação com nitrato-amônio. **Irriga, Botucatu**. v. 23, n. 2, p. 220-234, 2018.

DOSSA, K.; LI, D.; WANG, L.; ZHENG, X.; YU, J.; WEI, X.; FONCEKA, D.; DIOUF, D.; LIAO, B.; Cisse, N.; ZHANG, X. Dynamic transcriptome landscape of sesame (*Sesamum*

indicum L.) under progressive drought and after rewatering. **Genom Data**. v.11, p. 122–124, 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Protocolos para preparo de meios de cultura da Embrapa Agrobioenergia**, dezembro, 1999. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAB-2010/27335/1/doc110.pdf>>. Acesso em: 23 de ago. 2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Coleção plantar gergelim, A cultura do Gergelim. **Embrapa Informação Tecnológica Brasília**, 1º Ed. Distrito Federal, 2007.

ENDRES, L.; SOUZA, J.L.S.; TEODORO, I.; MARROQUIM, P.M.G.; SANTOS, C.M. S.; BRITO, J.E.D. Gas exchange alteration caused by water deficit during the bean reproductive stage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 11-16, 2010.

FANG, Y.; XIONG, L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**. v. 72(4), p. 673-689, 2015.

FEITOSA, S.S.; ALBUQUERQUE, M.B.; OLIVEIRA, A.P.; WALTER ESFRAIN PEREIRA, W.E.; NETO, J.F.B. Fisiologia do *Sesamum indicum* L. sob estresse hídrico e aplicação de ácido salicílico. **Irriga, Botucatu**. v. 21, n. 4, p. 711-723, 2016.

FERNANDES, R.H.; VIEIRA, B.S.; FUGA, C.A.G.; LOPES, E.A. *Pochonia chlamydosporia* e *Bacillus subtilis* no controle de *Meloidogyne incognita* e *M. javanica* em mudas de tomateiro. **Bioscience Journal**. v. 30, n. 1, 2013.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109-112, 2014.

FERREIRA, M.D.; SPRICIGO, P.C. Colorimetria - princípios e aplicações na agricultura. In: FERREIRA, M. D. (Ed.técnico). **Instrumentação pós-colheita em frutas e hortaliças**, São Carlos: Embrapa Instrumentação, p. 209-220, 2017.

FERREIRA, T.C.; BETTIOL, W. Biocontrole de patógenos de solo e promoção de crescimento vegetal promovidos por *Bacillus* spp. em milho. **Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management**. v. 15, n. 4, 2019. Disponível em: <<http://revista.uepb.edu.br/index.php/biofarm/article/view/5060/3314>>. Acesso em: 28 de ago. 2021.

FRANDOLOSO, J.F. **Eficiência de adubos fosfatados associados a enxofre elementar na cultura do milho**. 63p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2006.

GARCIA, A.; RIZZO, C.A.; UD-DIN, J.; BARTOS, S.L.; SENADHIRA, D.; FLOWERS, T.J.; YEO, A.R. Sodium and potassium transport to the xylem are inherited independently in rice, and the mechanism of sodium: potassium selectivity differs between rice and wheat. **Plant, Cell and Environment**. v. 20, p. 1167–1174, 1997.

GEBREGERGIS, Z.; ASSEFA, D.; FITWY, I. Sesame sowing date and insecticide application frequency to control sesame webworm *Antigastra catalaunalis* (Duponchel) in Humera, Northern Ethiopia. **Agriculture Food Security**. v. 7, p. 39, 2018.

GHARBY, S.; HARHAR., H.; BOUZOUBAA, Z.; ASDADI, A.; EL YADINI, A.; CHARROUF, Z. Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. v.33, p. 256–289, 2017.

GHOSH, D.C. Growth and productivity of summer sesame (*Sesamum indicum*) as influenced by biofertilizer and growth-regulator. **Indian Journal of Agronomy**. v. 45, n. 2, p. 389-394, 2000.

GHOLINEZHAD, E.; DARVISHZADEH, R.; MOGHADDAM, S.S.; POPOVIĆ-DJORDJEVIĆ, J. Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiological traits and enzymatic antioxidant activity. **Agricultural Water Management**. v. 238, p. 106-234, 2020.

GIANNOPOLITIS, C.N.; RIES, S.K. Superoxide desmutases occurrence in higher plants. **Plant Physiology**. v. 59, p. 14-309, 1977.

GIL, 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.

GLICK, B.R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. **Canadian Journal of Microbiology**. v. 41, p. 17-109, 1995.

GOMES, R.V.; COUTINHO, J.L.B. Gergelim. In: CAVALCANTI, F.J.A.; SANTOS, J.C.P.; PEREIRA, J.R.; LEITE, J.P.; SILVA, M.C.L.; FREIRE, F.J.; SILVA, D.J.; SOUSA, A.R.; MESSIAS, A.S.; FARIA, C.M.B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M.A; GOMES, R.V.; CAVALCANTI, A.C.; LIMA, J.F.W.F. Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco (2ª aproximação). 2.ed. Recife, **IPA**, p. 144, 1998.

GRILLO JÚNIOR, J.A.S.; AZEVEDO, P.V. Crescimento, desenvolvimento e produtividade do gergelim 'BRS Seda' na agrovia de Canudos, em Ceará Mirim (RN). **Revista Holos**, Natal. v. 2, p. 19-33, 2013.

GUPTA, D.K; PLAMA, J.M.; CORPAS, F.J. Antioxidants and antioxidant enzymes in higher plants. **Springer**. v. 1, p. 300, 2018.

HAQUE, M.M.; MOSHARAF, M.K.; KHATUN, M.; HAQUE, M.A.; BISWAS, M.S.; ISLAM, M.S.; ISLAM, M.M.; SHOZIB, H.B.; MIAH, M.M.U.; MOLLA, A.H.; SIDDIQUEE, M.A. Biofilm producing rhizobacteria with multiple plant growth-promoting traits promote growth of tomato under water-deficit stress. **Frontiers Microbiology**. v.11, n. 54, p. 20-53, 2020. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2020.542053/full>>. Acesso em: 21 de jan de 2021.

HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ALLAH, E.F.A. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**. v. 26, p. 1291–1297, 2019.

- HSU, D.Z.; SU, S.B.; CHIEN, S.P.; CHIANG, P.J.; LI, Y.H.; LO, Y.J.; LIU, M.Y. Effect of sesame oil on oxidative stress associated renal injury in endotoxemic rats: involvement of nitric oxide and proinflammatory cytokines. **Shock**. v. 24, n. 3, p. 276–280, 2005.
- HUSSEIN, Y.; AMIN, J.; AZEB, A.; GAHIN, H. Antioxidant activities during drought stress resistance of sesame (*Sesamum indicum* L.) plant by salicylic acid and kinetin. **Research Journal of Botany**. v. 11, p. 1–8, 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) – Censo Agropecuário. **Sidra**, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 11 de out 2019.
- JADHAV, S.R.; NAIKNAWARE, M.D.; PAWAR, G.R. Effect of nitrogen, phosphorus and biofertilizers on growth, yield and quality of summer sesamum (*Sesamum indicum* L.). **International Journal of Tropical Agriculture**. v.33, p. 475-480, 2015.
- JALEEL, C.A.; MANIVANNAN, P.; SANKAR, B.; KISHOREKUMAR, A.; GOPI, R.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. *Pseudomonas fluorescens* enhances biomass yield and ajmalicine production in *Catharanthus roseus* under water deficit stress. **Colloids Surf**. v. 60, p. 7-11, 2007.
- KADKHODAIE, A.; RAZMJOO, J.; ZAHEDI, M. Peroxisase, Ascorbate peroxidase e Catalase activities in drought sensitive, intermediate and resistance sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes. **International Journal of Agronomy and Plant Production**. v.4, n. 11, p. 3012-3021, 2013.
- KUSS, A. V.; KUSS, V. V.; LOVATO, T., FLORES, M. L. Fixação de nitrogênio e produção de ácido indolacético in vitro por bactérias diazotróficas endolíticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 42, n. 10, p. 1459-1465, 2007.
- LACERDA, C.F.; OLIVEIRA, E.V.; NEVES, A.L.; GHEYI, H.R.; BEZERRA, M.A.; COSTA, C.A. Morphophysiological responses and mechanisms of salt tolerance in four ornamental perennial species under tropical climate. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 24, n. 10, p. 656-663, 2020.
- LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**. v. 148, p. 350-382, 1987.
- LIMA, T.M.; PROCÓPIO, L.C.; BRANDÃO, F.D.; LEÃO, B.A.; TÓTOLA, M.R.; BORGES, A.C. Evaluation of bacterial surfactant toxicity towards petroleum degrading microorganisms. **Bioresource Technology**. v. 102, p. 2957-2964, 2011.
- LIMA, F.A.; SOUSA, G.G.; VIANA, T.V.A.; PINHEIRO NETO, L.G.; AZEVEDO, B.M.; CARVALHO, C.M. Irrigação da cultura do gergelim em solo com biofertilizante bovino. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.7, p.102-111, 2013.
- LIMA, M.S.R. **Crescimento e produção de gergelim (*Sesamum indicum* L.) em função de âminas de água**. 2013. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal da Paraíba.

LIN, C.C.; HSU, Y.T.; KAO, C.H. The effect of NaCl on proline accumulation in rice leaves. **Plant Growth Regulation**. v. 36, p. 275-285, 2002.

LOPES, M.S.; ARAUS, J.L.; HEERDEN, P.D.R.V.; FOYER, C.H. Enhancing drought tolerance in C4 crops. **Journal of Experimental Botany**, Oxford. v. 62, n. 9, p. 3135-3153, 2011.

LUCY, M.; REED, E.; GLICK, B.R. Applications of free-living plant growth-promoting rhizobacteria. **Antonie Van Leeuwenhoek**. v. 86, n. 1, p. 1-25, 2004. Disponível em: <encurtador.com.br/pHIV5>. Acesso em 14 de out de 2019.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STHAL, D. A. **Microbiologia de Brock**, 14. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2016.

MAGALHÃES FILHO, J. R.M.; AMARAL, L.R.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.

MANIVANNAN, P., JALEEL, C.A., SOMASUNDARAM, R., PANNEERSELVAM, R. Osmoregulation and antioxidant metabolism in drought-stressed *Helianthus annuus* under triadimefon drenching. **Comptes Rendus Biologies**. v. 331, p. 418-425, 2008.

MARULANDA, A.; PORCEL, R.; BAREA, J. M.; AZCÓN, R. Drought tolerance and antioxidant activities in lavender plants colonized by native drought-tolerant or drought-sensitive. **Microbial Ecology**. v.54, n. 3, p. 543-52, 2007.

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

MELO, E.B.S.; LIMA, L.M.; FERNANDES-JUNIOR, P.I.; AIDAR, S.T.; FREIRE, M.A.O.; FREIRE, R.M.M.; SANTOS, R.C. Nodulation, gas exchanges and production of peanut cultivated with *Bradyrhizobium* in soils with different textures. **Comunicata Scientiae**. v. 7, n. 2, p. 160-166, 2016.

MESQUITA, J.B.R.; AZEVEDO, B.M.A.; CAMPELO, A.R.; FERNANDES, C.N.V.; VIANA, T.V.A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga, Botucatu**. v. 18, n. 2, p. 364-375, 2013. Disponível em: <encurtador.com.br/eoxJU>. Acesso em: 12 de jul 2021.

MESQUITA, J.B.R. **Manejo da cultura do gergelim submetida a diferentes lâminas de irrigação, doses de nitrogênio e de potássio pelo método convencional e por fertirrigação**. 2010. 82f. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

MITTER, B.; BRADER, G.; PFAFFENBICHLER, N.; SESSITSCH, A. Next generation microbiome applications for crop production-limitations and the need of knowledge-based solutions. **Current Opinion in Microbiology**. v. 49, p. 59-65. 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369527419300402>>. Acesso em: 13 de jul 2021.

MORENO, A.L.; KUSDRA, J.F.; PICAZEVICZ, A.A.C. Rhizobacteria inoculation in maize associated with nitrogen and zinc fertilization at sowing. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 25, n. 2, p. 96-100, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/yGQvBCDsMb3wTJjYzvr77jn/abstract/?lang=en>. Acesso em: 19 de ago. 2021.

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

NAKANO, D.; KURUMAZUKA, D.; NAGAI, Y.; NISHIYAMA, A.; KISO, Y.; MATSUMURA, Y. Dietary sesamin suppresses aortic NADPH oxidase in DOCA salt hypertensive rats. **Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology**. v. 35, n. 3, p. 324–326, 2010.

NETO, M.E.; PEREIRA, W.E.; SOUTO, J.S.; ARRIEL, N.H.C. Crescimento e produtividade de gergelim em Neossolo Flúvico em função de adubação orgânica e mineral. **Revista Ceres**, Viçosa. v. 63, n.4, p. 568-575, 2016.

NITHYAPRIYA, S.; LALITHA, S.; SAYYED, R.Z.; REDDY, M. S.; DAILIN, D.J.; ENSHASY, H.A.E.; SURIANI, N.L.; HERLAMBANG, S. Production, purification, and characterization of bacillibactin siderophore of *Bacillus subtilis* and its application for improvement in plant growth and oil content in sesame. **Sustainability**. v. 13, p. 53-94, 2021. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5394#>>. Acesso em: 19 de ago. 2021.

OLDROYD, G.E.; DIXON, R. Biotechnological solutions to the nitrogen problem. **Current Opinion in Biotechnology**. v. 26, p. 19-24, 2014. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958166913006307>>. Acesso em: 19 de ago. 2021.

OLIVEIRA, F.A.; MEDEIROS, J.F.; ALVES, R.C.; LINHARES, P.S.F.; MEDEIROS, A.M.A.; OLIVEIRA, M.K.T. Interação entre salinidade da água de irrigação e adubação nitrogenada na cultura da berinjela. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.5, p.480–486, 2014.

OLIVEIRA, G.R.F.; SILVA, M.S.; MARCIANO, T.Y.F.; PROENÇA, S.L.; SÁ, M.E. Crescimento inicial do feijoeiro em função do vigor de sementes e inoculação com *Bacillus subtilis*. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 10, n. 4, p. 439-448, 2016. Disponível em:< <http://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/456/311>>. Acesso em 14 de out de 2019.

OZTURK, M.; UNAL, B.T.; CARRAPÓS, G.P.; KHURSHEED, A.; GUL, A.; HASANUZZAMAN, M. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. **Physiol Plant**. v. 172, p. 1321-1335, 2021.

PASCALE, B.B.; YUNRONG, C.; HERA, V.; RICHARD, L.; ROBERTO, K. *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides. **PNAS**, 110 (17) E1621-E1630, 2013. Disponível em: < encurtador.com.br/bmoEX >. Acesso em: 13 de out 2019.

PAULA, G.F.; DEMÉTRIO, G.B.; MATSUMOTO, L.S. Potencial biotecnológico de rizobactérias promotoras de crescimento de plantas de soja. **Revisa Caatinga**. v. 34 n. 2, 2021. Disponível em: < encurtador.com.br/cdswS >. Acesso em: 19 de ago. 2021.

PERIN, A.; CRUVINEL, J.D.; SILVA, W.J. Sesame performance as a function of NPK fertilization and soil fertility level. **Acta Scientiarum Agronomy**. v.32, n. 1, p. 93-98, 2010.

PRADO, R. M. Nutrição de plantas. São Paulo: **UNESP**, 407p, 2008.

QUEIROGA, V.P.; GONDIM, T.M.S.; VALE, D.G.; GEREON, H.G.M.; MOURA, J. A.; SILVA, P.J.; SOUZA FILHO, J.F. Produção de gergelim orgânico nas comunidades de produtores familiares de São Francisco de Assis do Piauí. **EMBRAPA-CNPA**, Campina Grande. p. 127, 2008.

RAMOS, J.P.C.; MOURA JÚNIOR, J.N.S.; SOUZA, F.F.; FERNANDES, J.D.; LIMA, V.I. Comportamento do número de frutos do gergelim (*Sesamum indicum*) sob diferentes quantidades de esterco bovino. IV Congresso Brasileiro de Mamona & I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa-PB. Campina grande: **Embrapa Algodão**. p. 509-513, 2010.

REMUSKA, A.C.; PRIA, M.D. Efeito de *Bacillus thuringiensis* e *Trichoderma sp.* no crescimento de fungos fitopatogênicos. **Ciências Agrárias Exatas e da Terra Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa. v. 13, n. 3, p. 31-36, 2007. Disponível em: < <http://ri.uepg.br:8080/riuepg/handle/123456789/125> >. Acesso em 14 de out de 2019.

RODRIGUES, C.M. **Alterações fisiológicas em sementes de gergelim (*Sesamum Indicum* L.) armazenamento, estresse hídrico e salino**. 2019. 99f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Produção Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns.

SANDHYA, V.; SHAIK, Z.A.; MINAKSHI, G.; GOPAL, R.; VENKATESWARLU, B. Drought-tolerant plant growth promoting *Bacillus spp.*: effect on growth, osmolytes, and antioxidant status of maize under drought stress. **Journal of Plant Interactions**. v.6, n. 1, p. 1-14, 2011. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17429145.2010.535178>>. Acesso em: 13 ago 2019.

SENTHILKUMAR, M.; SWARNALAKSHMI, K.; GOVINDASAMY, V.; LEE, Y. K.; ANNAPURNA, K. Biocontrol potential of soybean bacterial endophytes against *Rhizoctonia bataticola* fungus. **Current Microbiology**. v. 58, p. 288–93, 2009.

SELEIMAN, M. F.; AL-SUHAIBANI, N.; ALI N, A. M.; ALOTAIBI, M.; REFAY, Y.; DINDAROGLU, T.; ABDUL-WAJID, H. H.; BATTAGLIA, M. L. Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. **Plants (Basel)**. v. 28, n. 10, p. 259, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33525688/>. Acesso em: 07 de jul 2021.

SIERRA, N.D.F.; POSADA, L.F.; MARIA, G.S.; TABAREZ, M.R.; ESCOBAR, V.V.; ALVAREZ, J.C. *Bacillus subtilis* EA-CB0575 genome reveals clues for plant growth promotion and potential for sustainable agriculture. **Functional & Integrative Genomics**. v. 20, p. 575-

589, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10142-020-00736-x>>. Acesso em: 28 de ago. 2021.

SILVA, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília, Distrito Federal: **Embrapa Informação Tecnológica**. p. 627, 2009.

SILVA, A.C.; ANDRADE, F.P.; KOURI, J.; SOARES, J.J.; BEZERRA, J.R.C.; ARRIEL, N.H.C.; BELTRÃO, N.E.M.; SILVA, O.R.R.F.; FIRMINO, P.T.; LIMA, R.L.S.; GONDIM, T.M.S.; QUEIROGA, V.P. Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde. **Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília-DF, 1ª ed. p. 215, 2009.

SILVA, E.M.; LIMA, G.S.; GHEYI, H.R.; NOBRE, R.G.; SÁ, F.V.S.; SOUZA, L.P. Growth and gas exchanges in soursop under irrigation with saline water and nitrogen sources. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 22, n.11, p. 776-781, 2018.

SILVA, D.P.; FREITAS, C.E.S.; OLIVEIRA, P.B.; BUENO, P.A.A.; SILVA, C.C.; CRISTOFOLI, J.B. Efeito de biofertilizante inoculante de *Bacillus subtilis* e trichoderma spp. em áreas de cultivo agrícola no município de Nova Tebas – Paraná. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba. v. 2, n. 3, p. 1020-1027, 2019. Disponível em: <<http://www.brazilianjournals.com>>. Acesso em 14 de out de 2019.

SILVA, A.A.R.; LACERDA, C.N.; LIMA, G.S.; SOARES, L.A.A.; GHEYI, H.R.; FERNANDES, P.D. Morfofisiologia de Cultivares de gergelim submetidos a diferentes estratégias de uso de água salina. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial – Nordeste. v. 1, n. 1, p. 42-55, 2021.

SMITH, D.L.; GRAVEL, V.; YERGEAU, E. Editorial: signaling in the phytomicrobiome. **Frontier Plant Science**. v.8, p. 611, 2017.

SHARMA, P.; JHA, A.B.; DUBEY, R.S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, Cairo. v. 2012, n. 1, p. 1-26, 2012.

SOUZA, V.F. **Estudo de rede para compreender as respostas fotossintéticas de cafeeiros em condições de deficiência hídrica**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

SOUZA, G.G.; VIANA, T.V.A.; DIAS, C.N.; SILVA, G.L.S.; AZEVEDO, B.M. Lâminas de irrigação para cultura do gergelim com biofertilizante bovino. **Magistra**, Cruz das Almas. v. 26, n. 3, p. 347-356, 2014.

SOUZA, C.C.M.; PEDROSA, E.M.R.; ROLIM, M.M.; OLIVEIRA FILHO, R.A.; SOUZA, M.A.L.M.; PEREIRA FILHO, J.V. Crescimento e respostas enzimáticas do feijoeiro caupi sob estresse hídrico e nematoide de galhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 19. n. 2. p. 113-118, 2015.

STEIN, T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions. **Molecular microbiology**, v. 54, p. 857-857, 2005. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15853875>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

SUASSUNA, J.; FERNANDES, P.; BRITO, M.; ARRIEL, N.M.A.; FERNANDES, J. Tolerance to salinity of sesame genotypes in different phenological stages. **American Journal of Plant Sciences**, 1904-1920, 2017. Disponível em:<

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=77856>>. Acesso em: 17 de jul de 2021.

SU, R.; ZHOU, R.; MMADI, M. A.; LI, D.; QIN, A.; LUI, A.; WANG, J.; GAO, Y.; WEI, M.; SHI, L.; WU, Z.; YOU, J.; ZHANG, X.; DOSSA, K. Root diversity in sesame (*Sesamum indicum* L.): insights into the morphological, anatomical and gene expression profiles.

Planta. v. 250, n. 5, p. 1461-1474, 2019. Disponível

em:<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31321496>>. Acesso em: 29 de ago. de 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ª ed. Artmed, 888p, 2017.

VALERIO, Z. **Plasticidade fenotípica em *Miconia ligustroides* (DC.) Naudin (Melastomataceae) em cerrado stricto sensu e floresta estacional semidecídua: dados morfoanatômicos, histoquímicos e fisiológicos**. Botucatu, 2020. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Programa de Pós Graduação em Ciências Biológicas (Botânica), Universidade Estadual Paulista.

VARAMIN, J.K.; FANOODI, F.; SINAKI, J.M.; REZVAN, S.; DAMAVANDI, A. Foliar application of chitosan and nano-magnesium fertilizers influence on seed yield, oil content, photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activities of sesame (*Sesamum indicum* L.) under water-limited conditions. **Notule Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**. v. 48, n. 4, 2020. Disponível em: <<https://notulaeobotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/11852>>. Acesso em: 24 de ago. de 2021.

VINCENT, J.M. A manual for the practical study of nodule bacteria. **Blackwell Science Publication**, Oxford. 1970.

XU, G.W.; LU, D.K.; WANG, H.Z.; LI, Y. Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate. **Agricultural Water Management**. v.203, p. 385–394, 2018.

YANG, M.; HUANG, F.H. Current situation, existing problems, development trend and countermeasures of sesame industry in China. **China Oils Fats**. v.34, n. 1, p. 7–12, 2009.

YOUSEFZADEH-NAJAFABADI, M.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliarapplied salicylic acid. **Photosynthetica**. v. 4, p. 611–622, 2017.

ZHANG, R.; VIVANCO, J.M.; SHEN, Q. The unseen rhizosphere root-soil-microbe interactions for crop production. **Current Opinion in Microbiology**. v. 37, p. 8–14, 2017.