

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

BIOINSUMOS ALIVIAM O ESTRESSE OXIDATIVO E REGULAM A
FISIOLOGIA DO TRIGO EXPOSTO AO DÉFICIT HÍDRICO

DALTON DANTAS BRUN
SINVAL VICENZI JÚNIOR

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL

2025

BIOINSUMOS ALIVIAM O ESTRESSE OXIDATIVO E REGULAM A FISIOLOGIA DO TRIGO EXPOSTO AO DÉFICIT HÍDRICO

DALTON DANTAS BRUN

SINVAL VICENZI JÚNIOR

Orientador: Prof. Dr. CLEBERTON CORREIA SANTOS

Co-orientador (a): Profa. Dra. SILVANA DE PAULA QUINTÃO SCALON

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Grande Dourados, como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Dourados

Mato Grosso do Sul

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

V633b Vicenzi Junior, Sinval
BIOINSUMOS ALIVIAM O ESTRESSE OXIDATIVO E REGULAM A FISIOLÓGIA DO
TRIGO EXPOSTO AO DÉFICIT HÍDRICO [recurso eletrônico] / Sinval Vicenzi Junior, Dalton
Dantas Brun. -- 2025.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: CLEBERTON CORREIA SANTOS.
Coorientadora: SILVANA DE PAULA QUINTÃO SCALON.
TCC (Graduação em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Bacillus subtilis. 2. enzimas antioxidantes. 3. malondialdeído. 4. Parachlorella sp.. 5.
Trichoderma harzianum. I. Dantas Brun, Dalton. II. Santos, Cleberton Correia. III. Scalon, Silvana
De Paula Quintão. IV. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

BIOINSUMOS ALIVIAM O ESTRESSE OXIDATIVO E REGULAM A FISIOLOGIA DO TRIGO EXPOSTO AO DÉFICIT HÍDRICO


POR

SINVAL VICENZI JUNIOR


DALTON DANTAS BRUN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÔNOMO


Aprovado em: 18/11/2025

Documento assinado digitalmente
 **CLEBERTON CORREIA SANTOS**
Data: 04/12/2025 00:47:31-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Orientador - UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
 **THAISE DANTAS**
Data: 04/12/2025 05:57:54-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Me. Thaise Dantas Membro da banca
Membro da banca - UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
 **ANDERSON DOS SANTOS DIAS**
Data: 04/12/2025 11:32:22-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Me. Anderson dos Santos Dias Membro da banca
Membro da banca - UFGD/FCA

BRUN, Dalton Dantas; VICENZI JÚNIOR, Sinval. **Bioinsumos aliviam o estresse oxidativo e regulam a fisiologia do trigo exposto ao déficit hídrico**. 2025. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2025.

RESUMO

O déficit hídrico promove o aumento de espécies reativas de oxigênio, as quais prejudicam a morfofisiologia das plantas de interesse socioeconômico como o trigo. Assim, tornam-se necessários estudos com a finalidade de estabelecer agentes com potencial anti-estressantes, e nesse cenário os bioinsumos demonstram ser promissores. Objetivamos avaliar o potencial dos bioinsumos em aliviar o estresse oxidativo e contribuir na fisiologia do trigo durante e após a exposição ao déficit hídrico. As sementes foram inoculadas com os seguintes bioinsumos: i) microalga *Parachlorella* sp., ii) *Bacillus subtilis*, iii) *Trichoderma harzianum*, iv) *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, v) *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e vi) *Parachlorella* + *B. subtilis* + *T. harzianum*, além da testemunha (sem bioinsumos), associados a dois regimes hídricos: a) irrigado=irrigação realizada diariamente e b) déficit hídrico (DH): suspensão da irrigação. A análise das trocas gasosas foram avaliadas durante a fase de estresse e de pós-estresse, e os parâmetros bioquímicos no estresse e peso de mil grãos (PMG) no pós-estresse. As plantas sob DH tiveram aumento no conteúdo de malondialdeído e peróxido de hidrogênio. Por outro lado, as plantas inoculadas com *Parachlorella* sp. e *Bacillus subtilis*, isolados ou associados, reduziram esses níveis, sugerindo memória fisiológica induzida por esses bioinsumos, aliviando os danos oxidativos e maior eficiência do sistema de defesa pela ativação da superóxido dismutase e peroxidase, o que contribuiu na manutenção da taxa fotossintética e condutância estomática. Na fase pós-estresse, as plantas inoculadas apresentaram retomada mais eficiente das trocas gasosas. A inoculação do *T. harzianum* isolado não mitigou o estresse oxidativo e a atividade fisiológica. O PMG não foi influenciado pelos tratamentos, mas foi numericamente inferior nas plantas em DH sem bioinsumos. A inoculação dos bioinsumos via sementes é uma prática promissora na indução da tolerância fisiológica do trigo ao déficit hídrico.

Palavras-chave: *Bacillus subtilis*, enzimas antioxidantes, malondialdeído, *Parachlorella* sp., peróxido de hidrogênio, *Trichoderma harzianum*.

BRUN, Dalton Dantas; VICENZI JÚNIOR, Sinval. **Bioinputs alleviate oxidative stress and regulate the physiology of wheat exposed to water deficit**. 2025. 51 p. Undergraduate Thesis (Bachelor of Agronomic Engineering) – Faculty of Agricultural Sciences, Federal University of Grande Dourados, Dourados, 2025.

ABSTRACT

Water deficit promotes an increase in reactive oxygen species, which impair the morphophysiology of plants of socioeconomic interest, such as wheat. Thus, studies are needed to establish agents with anti-stress potential, and in this scenario, bio-inputs show promise. We aimed to evaluate the potential of bio-inputs to alleviate oxidative stress and contribute to wheat physiology during and after exposure to water deficit. The seeds were inoculated with the following bio-inputs: i) microalgae *Parachlorella* sp., ii) *Bacillus subtilis*, iii) *Trichoderma harzianum*, iv) *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, v) *Parachlorella* sp. + *T. harzianum*, and vi) *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*, in addition to the control (without bio-inputs), associated with two water regimes: a) irrigated = daily irrigation and b) water deficit (WD): suspension of irrigation. Gas exchange was evaluated during the stress and post-stress phases, and biochemical parameters were evaluated during stress and thousand-grain weight (TGW) during post-stress. Plants under WD had increased malondialdehyde and hydrogen peroxide content. On the other hand, plants inoculated with *Parachlorella* sp. and *Bacillus subtilis*, either alone or in combination, reduced these levels, suggesting physiological memory induced by these bio-inputs, alleviating oxidative damage and increasing the efficiency of the defense system through the activation of superoxide dismutase and peroxidase, which contributed to maintaining the photosynthetic rate and stomatal conductance. In the post-stress phase, inoculated plants showed a more efficient resumption of gas exchange. Inoculation with isolated *T. harzianum* did not mitigate oxidative stress and physiological activity. PMG was not influenced by the treatments, but was numerically lower in plants in DH without bio-inputs. Inoculation of bio-inputs via seeds is a promising practice in inducing physiological tolerance of wheat to water deficit.

Keywords: *Bacillus subtilis*, antioxidant enzymes, malondialdehyde, *Parachlorella* sp., hydrogen peroxide, *Trichoderma harzianum*.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por tudo que ele me proporcionou ao longo da minha caminhada tanto dentro como fora da universidade, por cuidar sempre de mim e da minha família para que eu pudesse estar bem emocionalmente para lidar com todas as preocupações da faculdade.

Quero agradecer imensamente a minha família, meu pai John Carlos Brun, minha mãe, Rosimeire Maria Dantas Brun, minha irmã, Ágda Dantas Brun, minha vó, Benedita Alves Dantas, e meu vô, Valmor Plácido Brun, por todo apoio tanto emocional, quanto financeiro e por nunca terem medido esforços para me ajudar a caminhar, crescer e conquistar meus sonhos, não só no período acadêmico, como em toda minha vida.

Também gostaria de agradecer a todos os demais membros da minha família que de alguma forma influenciaram na minha caminhada de vida e formação.

Agradecer a minha namorada Bruna Santos Moreira, por toda paciência e ajuda que teve durante o desenvolvimento acadêmico.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, que desde o início sempre se mostrou disponível, paciente, atencioso e empenhado em nos ensinar e transmitir seus conhecimentos da melhor forma possível.

A todos os membros do grupo GEEP, pelo auxílio no desenvolvimento das atividades desenvolvidas na universidade.

Dalton Dantas Brun

AGRADECIMENTOS

Agradecer sempre em primeiro lugar à Deus pois sem ele não teria capacidade de estar vivendo essa fase emocionante em minha vida, Ele sempre me deu forças, paciência, prosperidade, conhecimento e fé no processo para glorificar a sua vontade.

Agradecer minha família por todo apoio e suporte que desde o início me deram, principalmente meus pais, Sinval Vicenzi e Rosymeire Mateus Silvestrin Vicenzi, que são a base da minha vida e que sem eles nada disso seria possível viver. Meus avós maternos, Carmem e Ronaldo, que são minha inspiração de progredir e alcançar minhas conquistas diariamente, e meu avós paternos, Hilário e Virginia, que lá do céu estão me protegendo e guiando a cada dia da minha vida.

Aos meus irmãos, Enzo Vicenzi e Giovana Silvestrin Vicenzi, que me fazem acreditar em ser uma pessoa melhor para se ter orgulho e se espelhar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, que sempre acreditou no meu potencial, me deu confiança e insistência nos meus estudos, a paciência que teve comigo, a lealdade e amizade que se construiu durante esse percurso acadêmico.

Minha coorientadora Prof. Dra. Silvana Scalon pela base e carinho que teve conosco e tem com nosso grupo de estudos, além de todos os membros do grupo GEEP, pelo auxílio no desenvolvimento das atividades desenvolvidas na universidade.

Por fim todos que de alguma forma direta ou indireto contribuíram para que esse trabalho esteja concluído e progredindo as pesquisas acadêmicas.

Sinval Vicenzi Junior

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Trigo	3
2.2. Condições climáticas e déficit hídrico	4
2.3. <i>Bacillus subtilis</i>	6
2.4. <i>Trichoderma</i> spp.	7
2.5. Microalgas	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Condições gerais	10
3.2. Descrição dos bioinsumos	11
3.3. Inoculação dos bioinsumos e regimes hídricos	11
3.4. Fases de avaliação	12
3.5. Características avaliadas	12
3.5.1. Trocas gasosas	12
3.5.2. Marcadores do estresse oxidativo	13
3.5.3. Proteínas totais e atividade de enzimas antioxidantes	13
3.5.4. Produção de biomassa e atributos químicos do solo	14
3.5.5. Plasticidade fenotípica	15
3.6. Análise de dados	15
4. RESULTADOS	16
4.1. Fase de Estresse	16
4.1.1. Marcadores do Estresse Oxidativo e Metabolismo de Proteção	16
4.1.2. Trocas Gasosas	18
4.1.3. Aspecto Visual das Plantas	20
4.2. Fase Pós-Estresse	21
4.2.1. Trocas Gasosas	21
4.2.2. Aspecto Visual das Espigas	23
4.3. Plasticidade Fenotípica e Índice de Similaridade	23
5. DISCUSSÃO	26
6. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L., Poaceae) é uma espécie de representatividade socioeconômica. Segundo dados publicados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), verificou-se aumento de 0,09% na área de produção de trigo na safra de 2023/24 quando comparado ao ano anterior, totalizando 222,7 milhões de hectares mundial (CONAB, 2024). Nesse sentido, o Brasil produz aproximadamente 10 milhões de toneladas, alcançando o 14º lugar no ranking mundial de produção (CONAB, 2024).

Dessa forma, é imprescindível potencializar a produção de trigo no Brasil. Entretanto, frente às adversidades climáticas globais, acentuada pela alteração nos padrões de precipitação pluviométrica, ocorre a exposição das plantas ao estresse por deficiência ou escassez hídrica, um dos fatores mais preocupantes no cenário agrícola mundial. Isso, porque sob estresse ocorre a superprodução de espécies reativas de oxigênio (ERO) como o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), promovendo o estresse oxidativo por peroxidação lipídica e danos nas membranas celulares, o que reflete negativamente na eficiência fotossintética das plantas (Nicolai et al., 2024; Lima et al., 2024).

Na perspectiva da ecofisiologia da produção, a utilização de bioinsumos vem ganhando espaço no mercado devido aos seus diversos benefícios, se enquadrando nos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS). O Ministério da Agricultura e Pecuária tem incentivado o uso de bioinsumos a partir do Decreto n. 10.375, do Programa Nacional de Bioinsumos (Brasil, 2020), sendo considerada uma prática promissora nos sistemas agrícolas. No entanto, faltam informações técnicas quanto a inoculação das sementes a diferentes bioinsumos isoladamente ou em associação e seu potencial como agentes anti-estressantes no trigo.

Dentre os bioinsumos disponíveis no mercado agrícola, *Bacillus subtilis* e *Trichoderma harzianum* tem boa aceitação pelos produtores rurais, e sua inoculação pode conferir indução da tolerância aos estresses abióticos (Steffen et al., 2018; Yang et al., 2024) pelos seus efeitos na nutrifisiologia e bioquímica das plantas. O *B. subtilis* promove alterações benéficas nos mecanismos morfofisiológicos e enzimáticos e não enzimáticos (Khan et al., 2023), com ação bioestimulante, por ser capazes de produzir fitohormônios, como ácido indolacético (AIA), citocininas, giberelinas e etileno (Al-Tammar e Khalifa, 2022). Além disso, melhora a

eficiência no uso da água no tecido e na capacidade de retenção de água no solo (Bi et al., 2024), pois formam um biofilme na raiz (Araújo et al., 2024) que auxilia na manutenção do turgor.

No que se refere ao *T. harzianum*, geralmente estão associados à fração orgânica e à rizosfera da planta (Meyer et al., 2019). Esse grupo de microrganismo contribui no crescimento, pois favorecem a produção de substâncias promotoras de crescimento, como AIA (Machado et al., 2011), também, atuam na nutrição das plantas por favorecer na disponibilidade de nutrientes (Oliveira et al., 2012). Além desses benefícios, de acordo com Vieira et al. (2017), o *T. harzianum* atua na ativação de genes de aquaporinas (AQPs) e aquagliceroporinas (AQGPs), que são proteínas auxiliares através da membrana ao transporte de água da planta, assim, induzindo a tolerância ao estresse hídrico.

As microalgas também são bioinsumos que estão em crescente expansão no mercado agrícola, sendo classificadas como organismo fotossintetizante, constituída por organismos protistas eucarióticos (fotoautótrofos) e cianobactérias procarióticas (Bello, 2021). No grupo de microalgas, a *Parachlorella* sp., é relativamente recente em uso agrícola, mas em sua constituição são ricas em nutrientes, poliaminas, fitohormônios, enzimas, aminoácidos, carboidratos, proteínas e vitaminas (Levasseur et al., 2020; Álvarez et al., 2021), e estimulam as relações na microbiota do solo (Lee & Ryu, 2021). De modo geral, os benefícios das microalgas na mitigação de estresses estão relacionados aos mecanismos enzimáticos e não enzimáticos (Kusvuran, 2021).

Nesse sentido, considerando a escassez de informações técnicas do uso dos bioinsumos no trigo e seu potencial anti-estressante, hipotetizamos que embora o trigo seja sensível ao déficit hídrico, (i) a inoculação dos bioinsumos minimizam os efeitos estressantes, ativando mecanismos de defesa, como a atividade de enzimas antioxidantes, modulando sua plasticidade fenotípica, aliviando o estresse oxidativo sendo que, em conjunto, alterações essas irão auxiliar na resiliência fisiológica durante e pós-estresse. Por outro lado, (ii) acreditamos que as respostas benéficas dos bioinsumos são variáveis ao seu uso isolado ou associados. Objetivamos avaliar o potencial dos bioinsumos em aliviar o estresse oxidativo e contribuir na morfofisiologia do trigo durante e após a exposição ao déficit hídrico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.), é uma espécie anual, autopolinizadora, pertencente à tribo Triticeae da família Poaceae (Levy & Feldman, 2022), sendo majoritariamente cultivado em regiões temperadas, mas também sendo implantadas em regiões subtropicais e tropicais (Feldman, 2001). Por sua vez é considerado um dos cereais mais cultivados no mundo, sendo a base alimentar para inúmeras pessoas, além da grande representação econômica.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) publicou a análise mensal de março 2024 apresentados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), que teve uma área cultivada de cerca de 223 milhões de ha mundialmente, tendo aumento quando comparado à safra passada, e essa área cultivada está com rendimento esperado de aproximadamente 787 milhões de toneladas. Segundo a Secretária de Comércio e Relações Internacionais (SCRI), nos últimos anos, foram exportados US\$1,3 bilhões de trigo apenas pelo Brasil.

A classificação comercial brasileira do trigo é regulamentada pela IN Mapa nº 38/2010, escrita a fim de definir os padrões para os principais usos e classificações da farinha de trigo. São divididos em 2 grupos, sendo o primeiro voltado para a alimentação humana e o segundo grupo destinado a moagem e outras finalidades. Suas diferenças se dão em sua finalidade, onde distinguem, por exemplo, percentual do total dos defeitos danificados por calor, mofados e ardidos, acima de 5% para o primeiro grupo e acima de 10% para o segundo; além de presença de insetos vivos ou mortos e percentual de matérias estranhas, impurezas e defeitos acima do estabelecido para o trigo do primeiro grupo (MAPA, 2010).

O desenvolvimento da cultura trigo pode ser dividido basicamente em três principais fases: vegetativa, reprodutiva e enchimento de grãos. A vegetativa é o período desde a semeadura até o estágio de duplo anel, passando pela germinação e emergência e sendo diferenciada apenas pelas folhas, já a fase reprodutiva vai desde o estágio de duplo-anel até a antese ou floração, onde ocorre a diferenciação de estruturas florais e por fim a fase de enchimento de grãos por sua vez vai desde a antese até a maturação fisiológica (Cunha et al., 2002).

O trigo por ser uma planta C₃, é extremamente sensível ao déficit hídrico e a altas temperaturas (Ribeiro et al., 2022; Silva et al., 2025), o que prejudica o metabolismo foliar e o

crescimento das plantas, por isso são necessários os estudos visando melhor compreensão da sua plasticidade fenotípica quando exposto a essas condições adversas e principalmente estabelecer técnicas de manejo que podem induzir a tolerância.

Segundo Santos et al. (2012) as plantas tendem a ser mais sensíveis ao déficit hídrico no estágio de florescimento, e esses autores observam redução da produção de fitomassa e produtividade na cultura do trigo. Por outro lado, em estudo realizado por Rodrigues et al. (1998), os autores descreveram que a folha-bandeira apresentou maior sensibilidade e consequentemente menor rendimento, o que levou ao menor número de grãos por espiga, afetando a produtividade final, indicando sensibilidade ao déficit hídrico.

Estudos recentes têm mostrado que o déficit hídrico reduz taxa fotossintética devido a menor abertura dos estômatos e condutância estomática em resposta a redução acentuada do teor relativo de água foliar, além da depleção de ácidos orgânicos, o que reflete em aumento exacerbado no conteúdo de malondialdeído (MDA), indicando peroxidação lipídica e danos oxidativos (Sumitra et al., 2024; Schweiger et al., 2023).

De acordo com Wang et al. (2022), a limitada entrada de CO₂ — decorrente do fechamento estomático e da redução da transpiração — diminui a fotossíntese. Esse efeito também é resultado do desequilíbrio na atividade fotoquímica e no transporte de elétrons, que leva ao excesso de energia de excitação, causando fotoinibição e, por fim, a redução da fotossíntese líquida da cultura. Além disso, a menor disponibilidade de CO₂, associada à redução da fixação de carbono e à saturação do sistema de transporte de elétrons, favorece a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), resultando em estresse oxidativo e peroxidação lipídica. (Krieger-Liszkay e Shimakawa et al., 2022; Hasanuzzaman et al., 2022).

2.2. Condições climáticas e déficit hídrico

Os estudos testando regimes hídricos são fundamentais nas ciências agrárias, pois influenciam diretamente a produtividade das culturas agrícolas e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Alotaibi et al., 2025). O regime hídrico refere-se à distribuição e disponibilidade de água no solo ao longo do tempo, considerando fatores como precipitação, evapotranspiração, infiltração e capacidade de armazenamento de água no solo (Guerra et al., 2013), visando atender a necessidade hídrica das culturas agrícolas. No entanto, essa disponibilidade no solo pode ser alterada por diversos fatores.

As mudanças climáticas globais têm se intensificado nas últimas décadas, resultando em transformações significativas nos padrões climáticos, com repercussões diretas e indiretas para diversos setores, incluindo o setor agrícola. As alterações no clima global são causadas principalmente pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), que aumentam a temperatura média global e alteram os ciclos naturais do clima (Singh et al., 2024). Esses fenômenos têm implicações drásticas para a agricultura, que depende fortemente de condições climáticas previsíveis e favoráveis.

Uma das principais consequências das mudanças climáticas na produção agrícola é a alteração nos regimes de precipitação e aumento da temperatura média. Em muitas regiões, observa-se o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e chuvas intensas. A irregularidade das chuvas pode comprometer a disponibilidade de água no solo, a absorção de nutrientes, a fisiologia, afetando o crescimento das plantas e a produtividade das culturas (Saraiva et al., 2023; Antonini et al., 2024; Silva et al., 2025).

Sob condições de estresse hídrico e térmico, as plantas ativam mecanismos fisiológicos de defesa que reduzem a fotossíntese. O fechamento estomático, adotado para evitar a perda excessiva de água por transpiração e proteger o metabolismo celular, também limita a entrada de CO_2 , reduzindo a eficiência fotossintética e, conseqüentemente, o potencial produtivo (Zuffo et al., 2025).

Além de afetar o crescimento vegetal, o déficit hídrico desencadeia respostas metabólicas associadas ao estresse oxidativo, onde ocorre quando há um desequilíbrio de produção e eliminação de ERO, tais quais resultam em acúmulo excessivo desses compostos (Barbosa et al., 2023). ERO incluem moléculas reativas, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical superóxido (O_2^-), radical hidroxila (OH) e hidroperoxila (HO_2), que quando há reações peroxidativas podem danificar membranas celulares e macromoléculas essenciais, como proteínas, ácidos nucleicos e lipídios (Silva et al., 2025).

O estresse hídrico desencadeia a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que atuam na sinalização intracelular e sistêmica para promover ajustes no metabolismo vegetal e permitir a sobrevivência em condições adversas. Contudo, quando esses mecanismos são insuficientes, ocorre o acúmulo excessivo de EROs, levando ao estresse oxidativo e à morte celular. Nessas situações, a planta ativa seu sistema de defesa antioxidante para restabelecer o

equilíbrio entre oxidantes e antioxidantes, processo que impacta diretamente os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e nutricionais (Sousa et al., 2024).

2.3. *Bacillus subtilis*

O *Bacillus subtilis*, é uma bactéria gram-positiva, o qual exibe uma notável resiliência., sendo dessa forma um dos promotores de crescimento de plantas mais estudadas do mundo. Esse grupo de organismo, constituintes das Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas (BPCP), tem potencial de promover o crescimento de plantas, além de ser um bioestimulante capaz de produzir fitohormônios, como ácido indolacético, citocininas, giberelinas e etileno (Al-Tammar e Khalifa, 2022). Além disso, atuam no biocontrole de patógenos, uma vez que inibem os agentes fitopatogênicos por meio da produção de compostos bioativos, como antibióticos, sideróforos (Shah et al., 2018), produção de antimicrobianos e desencadeamento de resistência sistêmica induzida, respectivamente (Blake et al., 2021).

Também verificou-se que esse grupo de bactéria pode potencializar a resistência da planta ao estresse salino do solo, alterando a relação de K^+ para Na^+ (Hamid et al., 2021). Hashem et al. (2019) descreveram que o *Bacillus* tem potencial de formar endósporos que serão adaptável a condições adversas do ambiente e também secretam metabólitos que estimulam crescimento e saúde da planta, além da secreção de exopolissacarídeos e sideróforos que inibiram ou interromperam movimento de íons tóxicos ajudando o equilíbrio iônico, consequentemente a absorção de água pelas raízes.

As BPCP podem melhorar a resistência ao estresse hídrico e a tolerância salina-alcalina das culturas como estudado pelo Bi et al. (2024), o qual os autores observaram que na cultura do algodão, *B. subtilis* promoveu aumento da capacidade de retenção de água do solo, além de ajudar no processo de dessalinização. Também foi observado por Ferreira et al. (2018) que quando inoculado esse grupo de bactéria no milho, mesmo em condições salinas teve como resultado um aumento no crescimento, induzindo tolerância a esse estresse por meio da atividade enzimática e a produção de compostos orgânicos, como por exemplo a ACC desaminase que metaboliza o 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) que é um dos fatores que causa salinidade e consequentemente estresse na planta diminuindo seu crescimento. Ainda, esses autores relataram que, com a inoculação do *Bacillus*, as plantas apresentaram maior teor de clorofila, resposta essa que está associada à melhor conteúdo de água nas folhas.

Dessa forma, o *B. subtilis*, como a BPCP mais existente na natureza, vem sendo comumente aplicada na agricultura devido sua promoção nas melhorias na rizosfera, absorção de água e nutrientes e o aumento da produtividade (Abbasi et al., 2011; Ahmad et al., 2014; Duan et al., 2020; Fang et al., 2021; Bi et al., 2024). De acordo com estudos realizados por Hou et al. (2018), foi observado que o *B. subtilis* tem potencial de melhorar a agregação do solo, ampliar a capacidade de retenção de água, diminuir a salinidade do solo e, conseqüentemente, potencializar a produtividade do trigo e a eficácia no uso da água.

Diversos estudos relatam que a inoculação com *B. subtilis* melhora o desempenho fisiológico de forma com que aumenta a taxa fotossintética, teor de clorofila, eficiência no uso de água e, absorção de nutrientes essenciais (Arias et al., 2021; Zou et al., 2022), além de estimular o sistema antioxidante como, maior atividade de enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) e fenilalanina amônia-liase (PAL), que são responsáveis por reduzir o acúmulo de ERO, e conseqüentemente, minimizar os danos oxidativos causados por estresse abiótico (Hashem et al., 2019; Guoyi et al., 2025). No caso do déficit hídrico, a inoculação com *B. subtilis* tem sido associada à manutenção do potencial hídrico foliar, com aumento da síntese de prolina e açúcares solúveis, além de indução de genes de tolerância à restrição hídrica, resultando em maior resiliência e recuperação após o período de estresse abiótico por seca (Lastochkina et al., 2020; Kuramshina et al., 2023).

2.4. *Trichoderma* spp.

Trichoderma harzianum é um fungo habitante do solo que habita no ambiente próximo às raízes das plantas, a rizosfera (Carvalho et al., 2008). Pertencente à classe Sordariomycetes do filo Ascomycota, esses fungos se reproduzem majoritariamente de forma assexuada, variando de acordo com sua diversificação (Meyer et al., 2019).

O gênero *Trichoderma* possuem fungos que atuam como parasitas e decompositores de matéria orgânica, além de possuir características fenotípicas comuns, como ampla distribuição geográfica, rápido crescimento e alta capacidade de parasitar, onde no caso de algumas espécies podem estabelecer interações benéficas com plantas, o que gera promoção de crescimento e indução de resistência ao estresse biótico e abiótico (Nascimento et al., 2022).

Logo, ao que se diz a relação ao estresse hídrico, o *Trichoderma* pode promover o crescimento vegetal através da produção de auxinas, que promove o crescimento através de divisão celular, diferenciação e formação de órgãos e raízes secundárias, além de melhor

distribuição das raízes (Galeano et al., 2024), dessa forma ampliando o potencial de absorção de água e nutrientes, logo, mitigando esse estresse induzido.

De acordo com Geng et al. (2025), o *T. harzianum* também é capaz de regular síntese de fitohormônios essenciais, como ácido abscísico (ABA), ácido indol-3-acético (IAA), aumentando a capacidade fisiológica da planta em resposta aos fatores estressores como o estresse hídrico. Além disso, segundo esses autores esse grupo de microrganismos, atuam na atividade antioxidante, reduzindo as ERO e danos oxidativos, melhorando o equilíbrio redox intracelular, absorção de nutrientes, desenvolvimento radicular e metabolismo secundário.

Saha et al. (2025) demonstram os benefícios do fungo ao relatar que sua presença promove o acúmulo de osmólitos, açúcares solúveis e prolina nas plantas. Esse acúmulo contribui para o equilíbrio osmótico, prevenindo a desidratação. A prolina, além disso, atua como agente protetor contra espécies reativas de oxigênio, auxiliando na estabilização das membranas celulares e na proteção de proteínas, reduzindo os danos ocasionados pelo estresse oxidativo.

2.5. Microalgas

As microalgas são microrganismos que abrangem uma ampla morfologia e genética, podendo ser representado por cianobactérias ou clorófitas (Victor et al., 2024). Sua coloração variada é uma característica oportunizada por pigmentos e mecanismos fotoautotrófico. Quanto sua genética, as microalgas são compostas por espécies procarióticas ou eucarióticas, de acordo com o período em que surgiram no planeta (Schmitz et al., 2012).

A biomassa das microalgas podem ser fonte potencial para a produção de bioprodutos, como biofertilizantes, produtos farmacêuticos, produtos cosméticos, entre outros (Hachicha et al., 2022), ou seja, contribuindo no aspecto da bioeconomia.

As microalgas apresentam elevada capacidade de sobrevivência em ambientes extremos e possuem demanda relativamente baixa de nutrientes para seu crescimento. Por isso, podem ser cultivadas em águas residuárias, o que reduz significativamente os custos de produção (Kumar et al., 2020). Dessa forma, o cultivo de biomassa microalgal pode ser integrado a instalações tradicionais de tratamento de efluentes, permitindo um uso mais eficiente e sustentável das microalgas tanto na produção de biofertilizantes quanto no tratamento de águas residuais (Marks et al., 2019).

Na agricultura, as microalgas contribuem para a fertilidade do solo e promovem o crescimento e a proteção das plantas (Gonçalves et al., 2023), oferecendo uma alternativa sustentável para reduzir a necessidade de fertilizantes e outros insumos químicos. Elas podem melhorar os parâmetros físico-químicos do solo, aumentar a capacidade de retenção de água, favorecer a agregação de partículas e, conseqüentemente, beneficiar o desenvolvimento vegetal (Alvarez et al., 2021).

As microalgas produzem substâncias bioativas, como fitohormônios, que promovem o crescimento das plantas ao induzir diversos processos fisiológicos em seu metabolismo (Quintas-Nunes et al., 2023). Entre esses compostos destacam-se ácidos abscísico, jasmônico e salicílico, citocininas, giberelinas, estrigolactonas, brassinosteroides e etileno, além de polipeptídeos, aminoácidos, polissacarídeos e sideróforos (Santos et al., 2023). Além disso, as microalgas aumentam a atividade antioxidante, estimulam a produção de fitoquímicos e promovem o incremento de pigmentos fotossintéticos, protegendo as plantas contra estresses abióticos. Esses efeitos estão associados à modulação de processos metabólicos que mantêm o equilíbrio redox celular e estimulam funções fisiológicas essenciais, resultando em plantas mais vigorosas e resistentes (Fiorentino et al., 2025; Santos et al., 2025).

Em contexto nacional, o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC) tem investido milhões de reais em programas de pesquisa, desenvolvimento e inovação voltados à produção de bioprodutos a partir de microalgas (Santos et al., 2023). Nesse cenário, as microalgas mostram-se promissoras na agricultura como bioestimulantes, uma vez que seus compostos bioativos — como fitohormônios, aminoácidos solúveis e nutrientes — promovem o crescimento vegetal, aumentam a produtividade e melhoram a disponibilidade de nutrientes essenciais, além de conferir maior resistência das plantas a estresses ambientais, conforme demonstrado em estudos com aplicação de extratos de microalgas no cultivo de tomate (Parmar et al., 2023; Çakirsoy et al., 2022).

No entanto, estudos com *Parachlorella* sp. ainda são insuficientes e até escassos quando direcionados a fisiologia do estresse vegetal como agentes anti-estressante ou até mesmo com ação biofertilizante ou bioestimulante, reforçando a necessidade de pesquisas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Condições gerais

O experimento foi desenvolvido no período de fevereiro a julho de 2025, na Faculdade de Ciências Agrárias (22,19662° S, 54,93385° O), da Universidade Federal da Grande Dourados-UFGD, em Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. Foram utilizados vasos plásticos de 8 kg previamente preenchidos com Latossolo Vermelho Distroférico, de textura argilosa, cujos os atributos químicos foram: pH H₂O: 5,34, P: 27,61 mg dm⁻³, K, Ca, Mg, Al, H + Al, soma de bases e capacidade de troca catiônica: 0,106; 3,37; 1,47; 0,24; 7,92; 4,94 e 12,87 cmol_c dm⁻³, pH SMP: 5,69 e saturação por bases (V%): 45,5.

Os vasos foram mantidos em ambiente com estrutura revestida com cobertura superior e lateral de plástico de alta densidade de 150 micras para evitar precipitações pluviométricas, favorecendo o manejo da indução ao déficit hídrico. Os valores de temperatura e umidade relativa durante o experimento foram registrados com termo-higrômetro e estão apresentados na Figura 1.

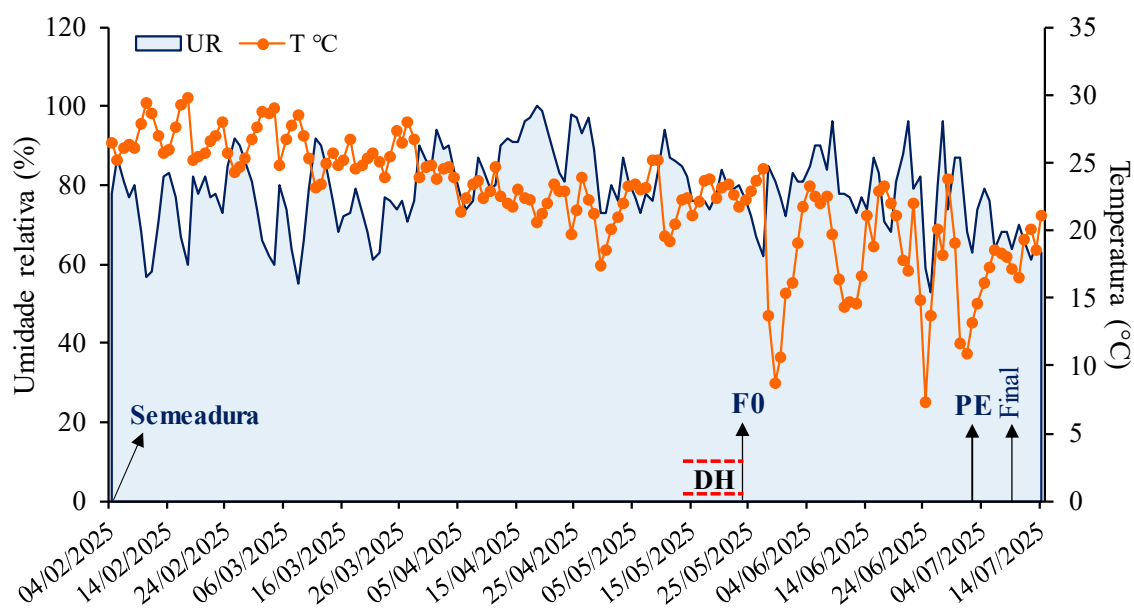


FIGURA 1. Temperatura e umidade relativa (UR) durante o experimento avaliando o efeito da inoculação de bioinsumos em sementes de trigo e seu reflexo morfofisiológico durante e após a exposição ao estresse pelo déficit hídrico (DH). F0: fotossíntese próximo a zero, PE: final do pós-estresse. Os dados foram apresentados na figura por decêndio

3.2. Descrição dos bioinsumos

A microalga *Parachlorella* sp. usada neste estudo foi produzida no fotobiorreator tipo Raceway de 4.000 L em um meio de cultura adaptado de Ribeiro et al. (2020), acondicionada em estufa fechada com luz natural, fotoperíodo de 12/12 (claro/escuro) e aeração constante. A cultura da microalga *Parachlorella* sp. foi utilizada sem prévia diluição, e continha 5×10^6 células mL^{-1} , pH de 7,5, 0,62% de nitrogênio e 2,02% de carbono orgânico, além de aminoácidos e fitohormônios (dados não apresentados). Utilizou-se o isolado IB19/17 de *Trichoderma harzianum* (2×10^9 conídios viáveis g^{-1}) e a cepa UVF S1 de *Bacillus subtilis* (1×10^8 UFC mL^{-1}), previamente preparado em 5,0 g L^{-1} e 14,0 mL L^{-1} , respectivamente, conforme recomendação dos fabricantes.

3.3. Inoculação dos bioinsumos e regimes hídricos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, no qual os tratamentos foram constituídos de quatorze condições de cultivo provenientes da associação da inoculação de diferentes bioinsumos aos dois regimes hídricos, com quatro repetições. A unidade experimental foi constituída de um vaso com quatro plantas.

As sementes de trigo cv. Gralha azul foram submetidas a inoculação com os seguintes bioinsumos isolados ou associados: i) microalga *Parachlorella* sp., ii) *B. subtilis*, iii) *T. harzianum*, iv) *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, v) *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e vi) *B. subtilis* + *Parachlorella* sp. + *T. harzianum*, além da testemunha sem bioinsumo (CK, vii). A inoculação foi realizada utilizando uma micro pipeta adicionando a dose total de 10 mL kg semente^{-1} (Silva et al., 2024) de cada tratamento, deixando-as em descanso durante 30 minutos antes da semeadura.

A capacidade de retenção de água (CRA) no solo de cada vaso foi mantida em 70% de acordo com a metodologia de Souza et al. (2000). Decorridos 15 dias após a emergência foi feito o desbaste, deixando quatro plantas por vaso. Ao atingirem o estágio de emborrachamento, o que ocorreu aos 98 dias após a semeadura (DAS), as plantas foram divididas em dois grupos de regimes hídricos: i) irrigado (CK), mantendo as plantas com 70% CRA, e ii) déficit hídrico (DH), caracterizado pela suspensão total da irrigação (Figura 2).

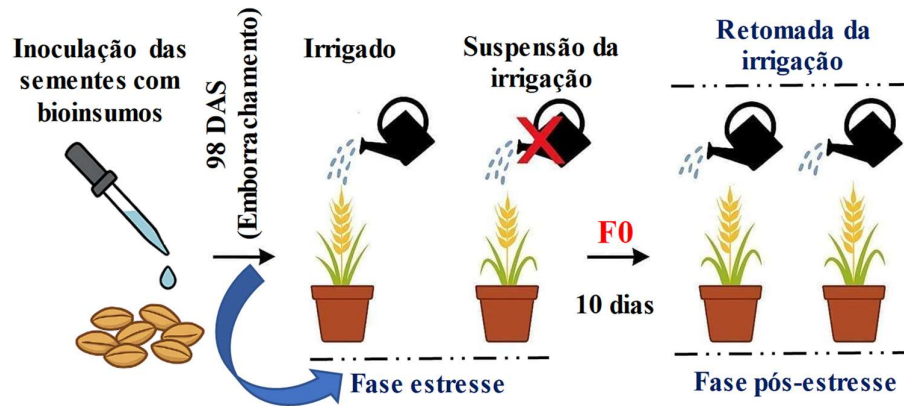


FIGURA 2. Esquema ilustrativo experimental avaliando o efeito da inoculação de bioinsumos em sementes de trigo e seu reflexo morfofisiológico durante e após a exposição ao estresse pelo déficit hídrico. DAS: dias após a semeadura, F0: fotossíntese próximo a zero

Na semeadura foi feita adubação de base com NPK conforme recomendação de Schneider et al. (2023), utilizando as fontes ureia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

3.4. Fases de avaliação

As avaliações das trocas gasosas foram realizadas no período da manhã, nas folhas bandeiras, quando as plantas de algum dos tratamentos sob suspensão da irrigação (SI), caracterizado como fase estresse, apresentassem valor de fotossíntese próximo a zero (F0), o que ocorreu aos 10 dias de SI (108 DAS) (Figura 1). Nesse momento também foram realizadas as determinações dos marcadores do estresse oxidativo e do metabolismo de proteção e o registro visual das características fenotípicas.

Após esse período, todas as plantas foram submetidas a retomada da irrigação (REI), caracterizando a fase de pós-estresse, até que as plantas previamente submetidas a SI apresentassem valores de $A \geq 1,00 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ocorrendo aos 12 dias de REI (120 DAS).

3.5. Características avaliadas

3.5.1. Trocas gasosas

A determinação dos valores de fotossíntese (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi feita no período matutino, utilizando sistema portátil de análise de gás por infravermelho (IRGA) – LCI Pro-SD ADC Bio

Scientific Ltd., com radiação fotossinteticamente ativa $> 900 \mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A partir desses dados foi calculada a efici\ecia no uso da \u00e1gua ($EUA=A/E$, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Antes de realizar a suspens\ao da irriga\cao, denominado tempo zero, foi feita uma caracteriza\cao inicial da fotoss\intese em fun\cao de cada inocula\cao (Tabela 1).

TABELA 1. Valores m\edios de fotoss\intese (A) em plantas de trigo provenientes de sementes inoculadas com bio\insumos isolados ou associados um dia antes da suspens\ao da irriga\cao. UFGD, Dourados – MS, 2025

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
$A (\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1})$						
5,20	4,69	3,98	4,79	4,02	4,95	4,70

T1: controle (sem bio\insumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*

Para as determina\c\es dos marcadores do estresse oxidativo e do metabolismo de prote\cao, as folhas frescas (MF) foram coletadas e previamente congeladas em N l\quido.

4.5.2. Marcadores do estresse oxidativo

Para obten\cao do extrato, o material foi macerado em Nitrog\ecio l\quido. Ap\os a centrifuga\cao (10.000 rpm, 10 minutos) foi realizada a leitura da absorb\ancia do sobrenadante em espectrofot\metro (Metash V-5000) em 535 e 600 nm para malondialde\ido (MDA, $\text{nmol g}^{-1} \text{ MF}^{-1}$) e 390 nm para per\oxido de hidrog\ecio (H_2O_2 , $\mu\text{mol g}^{-1} \text{ MF}$), determinados seus conte\udos conforme metodologia de Heath e Packer (1968) e Alexieva et al. (2001), respectivamente.

4.5.3. Prote\inas totais e atividade de enzimas antioxidantes

A macera\cao de 0,3 g de folhas foi feita em 6,0 mL de solu\cao, contendo 0,3 g polivinilpirrolidona dilu\ida em 100 mL de solu\cao tamp\ao de fosfato de pot\ssio, centrifugando as amostras \u00e0 12.000 rpm durante 20 minutos e o sobrenadante foi utilizado como extrato enzim\atico. O conte\udo de prote\inas totais foi determinado conforme metodologia de Bradford (1976), no qual a leitura da absorb\ancia foi realizada em 595 nm, utilizando espectrofot\metro, resultados expressos em $\text{mg g}^{-1} \text{ MF}^{-1}$. A atividade da peroxidase (POD, $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ prote\ina) e da super\oxido dismutase (SOD, $\mu\text{g g}^{-1}$ prote\ina) foi determinada conforme

metodologia de Broetto (2014) e Giannopolitis e Reis (1977) em 470 e 560 nm, respectivamente.

4.5.4. Produção de biomassa e atributos químicos do solo

Aos 30 dias após a REI (140 DAS) as plantas foram retiradas inteiras dos vasos, lavando as raízes, acondicionando-as em estufa com circulação forçada de ar ($60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$) por aproximadamente 72 horas, e também foi realizada a avaliação de peso de mil grãos (PMG). Nesse mesmo período, foram coletadas amostras compostas de solo em função de cada tratamento (inoculação e regimes hídricos) para caracterização (Tabela 2), utilizando a metodologia proposta por Silva (2009).

TABELA 2. Atributos químicos do solo utilizado no cultivo de trigo cv. Gralha azul proveniente de sementes inoculadas com bioinsumos isolados e associados, e submetidos a dois regimes hídricos (controle - irrigado e déficit hídrico), aos 140 DAS. UFGD, Dourados – MS, 2025

	pH CaCl ₂	P mg dm ³	K -----cmol _c dm ³ -----	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V%
Controle										
T1	5,15	5,16	0,047	3,43	1,62	0,024	2,30	5,10	7,4	68,9
T2	5,01	15,25	0,069	3,81	1,79	0,024	2,53	5,68	8,21	69,2
T3	4,97	3,83	0,062	3,07	1,37	0,024	2,75	4,51	7,26	62,1
T4	4,95	3,43	0,056	3,41	1,57	0,024	2,58	5,04	7,62	66,1
T5	4,95	4,04	0,039	3,61	1,58	0,024	2,50	5,23	7,73	67,7
T6	4,91	4,34	0,047	3,39	1,48	0,024	2,20	4,93	7,13	69,1
T7	4,89	3,32	0,043	3,16	1,42	0,024	2,22	4,63	6,85	67,6
Déficit hídrico										
T1	5,47	6,08	0,060	3,24	1,41	0,024	3,19	4,72	7,91	59,7
T2	5,38	3,32	0,051	2,99	1,40	0,024	2,45	4,45	6,9	64,5
T3	5,32	5,46	0,054	3,01	1,40	0,024	2,25	4,47	6,72	66,5
T4	5,23	7,60	0,066	3,28	1,41	0,024	2,09	4,76	6,85	69,5
T5	5,19	2,20	0,034	3,11	1,47	0,024	1,86	4,62	6,48	71,3
T6	5,12	5,16	0,054	3,40	1,53	0,024	2,00	4,99	6,99	71,4
T7	5,12	3,32	0,073	3,53	1,59	0,024	2,27	5,20	7,47	69,6

T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*

3.5.5. Plasticidade fenotípica

O índice de plasticidade fenotípica (IPF) para MDA na fase estresse e para *A* na fase de estresse e pós-estresse foi calculado utilizando metodologia proposta por Valladares et al. (2006). Com o objetivo de verificar o potencial mitigador dos bioinsumos sobre o déficit hídrico, o cálculo foi realizado utilizando apenas os valores das plantas sob déficit hídrico, sem ou com inoculação dos bioinsumos em comparação as plantas irrigadas sem inoculação (T1).

3.6. Análise de dados

Os dados obtidos em cada fase (estresse e pós-estresse) foram analisados individualmente, ou seja, não comparando-as estatisticamente. Todos os dados foram submetidos à análise de variância, e quando significativos pelo teste F ($p \leq 0,05$), as médias em função dos quatorze tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$) \pm erro padrão, utilizando o *software* SISVAR. Os dados de IPF foram apresentadas de maneira descritiva, ou seja, sem comparação estatística. A partir dos dados das características avaliadas nas duas fases foi calculado o índice similaridade entre os tratamentos baseados na distância Euclidiana, utilizando o método Classical pelo agrupamento UPGMA, utilizando o *software* PAST.

4. RESULTADOS

4.1. Fase de Estresse

4.1.1. Marcadores do Estresse Oxidativo e Metabolismo de Proteção

As plantas de trigo expostas ao déficit hídrico (DH) não inoculadas (CK) e aquelas com *T. harzianum* e a associação *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum* apresentaram maiores conteúdos de MDA ($> 9,00 \text{ nmol g}^{-1} \text{ MF}^{-1}$), especialmente em comparação as irrigadas, enquanto as plantas com as demais inoculações também sob DH tiveram menores valores (Figura 3A). Na condição irrigadas, todas as plantas inoculadas apresentaram menor conteúdo de MDA em comparação as sem inoculação.

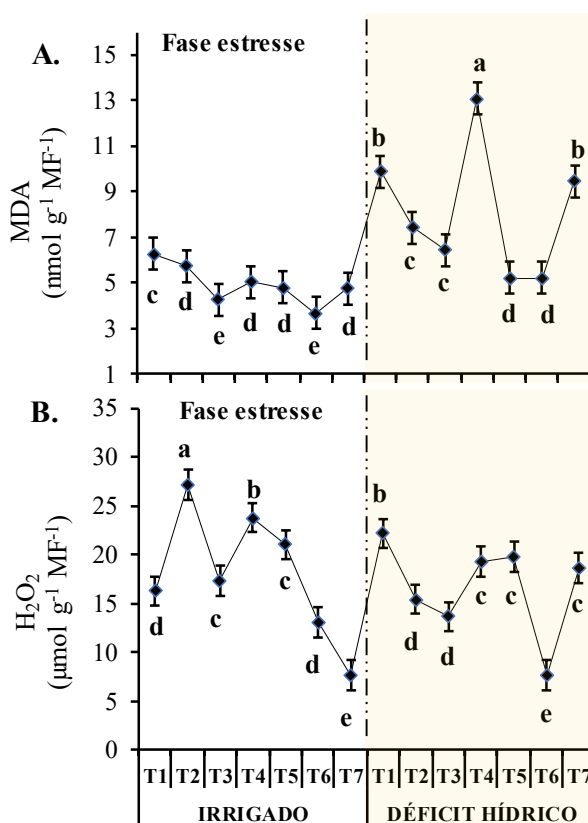


FIGURA 3. Conteúdo de malondialdeído – MDA (A) e de peróxido de hidrogênio – H_2O_2 (A) em folhas de trigo cv. Gralha azul provenientes de sementes inoculadas com bioinsumos isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, na fase de estresse. UFGD, Dourados – MS, 2025. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05 \pm$ erro padrão). T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*.

As plantas irrigadas provenientes da inoculação com *Parachlorella* sp. e *T. harzianum* e as não inoculadas sob déficit hídrico tiveram maiores conteúdos de H_2O_2 (27,14; 23,75 e 22,21 $\mu\text{mol g}^{-1} \text{MF}^{-1}$, respectivamente), diferindo estatisticamente das demais condições, inclusive das plantas não inoculadas irrigadas (Figura 3B). Na condição de DH as plantas provenientes da inoculação com bioinsumos tiveram menores conteúdos de H_2O_2 , especialmente quando comparadas as sem bioinsumos nesse mesmo regime hídrico.

No que se refere ao conteúdo de proteínas totais, as plantas não inoculadas e irrigadas e todas em condição de déficit hídrico, exceto as inoculadas com *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* (30,18 mg MF^{-1}), apresentaram maiores valores, diferindo estaticamente das plantas nas demais condições (Figura 4A).

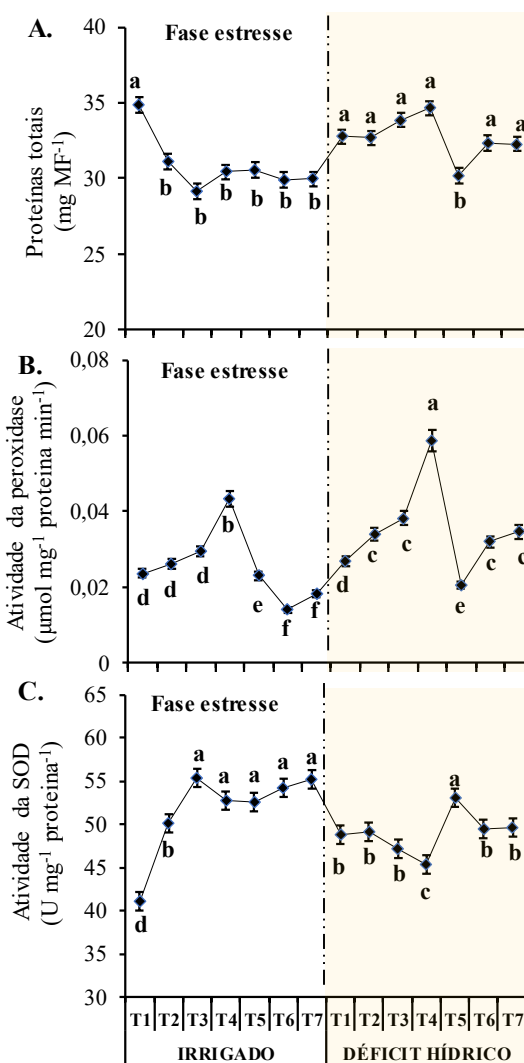


FIGURA 4. Conteúdo de proteínas (A), atividade da superóxido dismutase – SOD (B) e da peroxidase – POD (C) em folhas de trigo cv. Gralha azul provenientes de sementes

inoculadas com bioinsumos isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, na fase de estresse. UFGD, Dourados – MS, 2025. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05 \pm$ erro padrão). T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*.

A atividade da POD foi maior nas plantas provenientes da inoculação de *T. harzianum* nos dois regimes hídricos ($> 0,040 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína), diferindo das demais condições (Figura 4B). Na condição irrigada, as plantas com inoculações combinadas de microalga com os demais microrganismos resultaram em menor atividade da POD, enquanto que sob DH foram as plantas não inoculadas e aquelas com *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* ($0,027$ e $0,020 \mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ proteína, respectivamente).

Verificamos aumento da atividade da SOD nas plantas não inoculadas sob DH em comparação as irrigadas também sem bioinsumo (Figura 4C). Além disso, na condição de DH as plantas inoculadas com *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* tiveram maior atividade enzimática em comparação com as demais nesse mesmo regime hídrico. Ressaltamos que em geral a inoculação dos bioinsumos nas sementes favoreceu aumento da atividade da SOD nas plantas irrigadas.

4.1.2. Trocas Gasosas

A taxa fotossintética (A) nas plantas CK (sem inoculação) e com *T. harzianum* ambos sob déficit hídrico apresentaram menores valores ($0,75$ e $0,59 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente) (Figura 5A), enquanto as plantas com as demais inoculações nessa mesma condição apresentaram valores superiores. Ressaltamos que as plantas com microalga *Parachlorella* sp., *B. subtilis* e *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* mesmo sob déficit hídrico apresentaram valores que não diferiram estatisticamente das plantas CK irrigadas (Figura 4A).

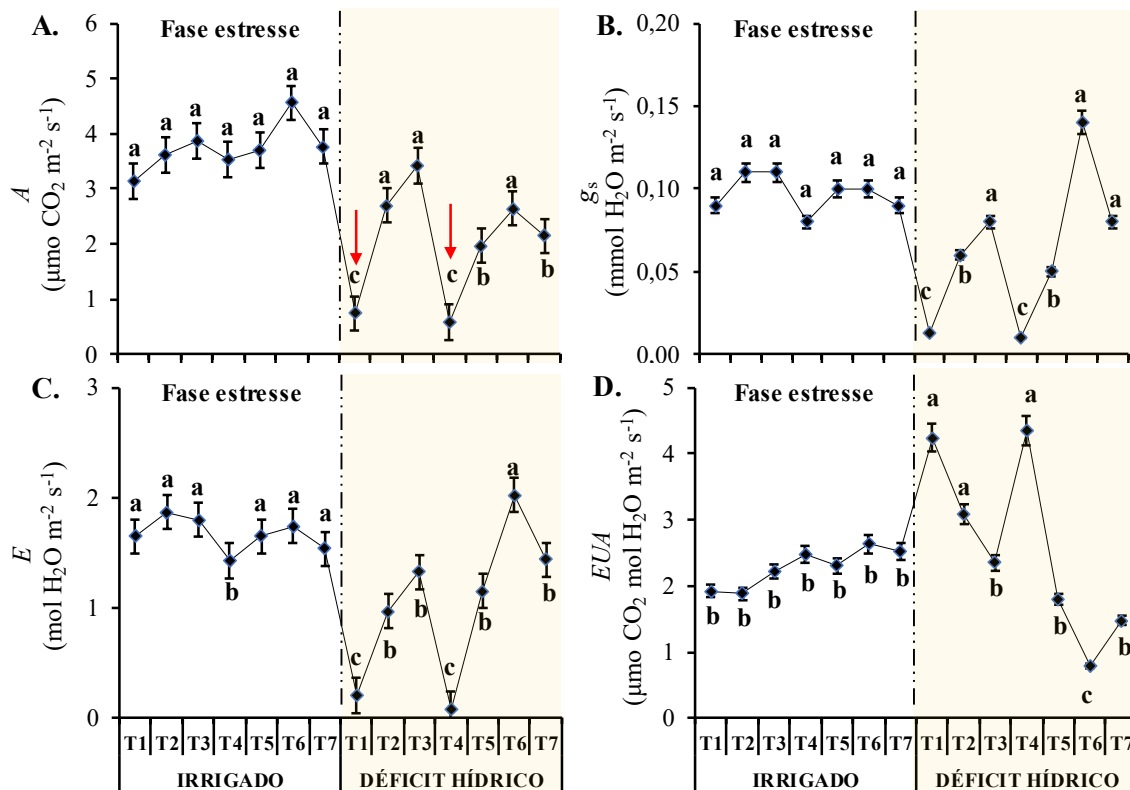


FIGURA 5. Taxa fotossintética – A (A), condutância estomática – g_s (B), transpiração – E (C) e eficiência no uso d'água – EUA (D) em folhas de trigo cv. Gralha azul provenientes de sementes inoculadas com bioinsumos isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, na fase de estresse. UFGD, Dourados – MS, 2025. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05 \pm$ erro padrão). T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*

A condutância estomática (g_s) não variou estatisticamente entre os tratamentos na condição irrigada, com valores próximos de $0,10 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 5B). Entretanto, em déficit hídrico, observou-se redução acentuada em alguns tratamentos, especialmente nas plantas CK e com *T. harzianum* apresentaram os menores valores de g_s , diferindo estatisticamente dos demais tratamentos nessa condição, os quais foram superiores (Figura 5B).

As plantas irrigadas e inoculadas com *T. harzianum* tiveram menor valor de transpiração (E), enquanto os demais não apresentaram diferença estatística nessa condição (Figura 5C). Entretanto, sob déficit hídrico, houve redução na maioria dos tratamentos, sendo que as plantas de trigo com o tratamento de *T. harzianum* e sem tratamento, CK, atingiram menor valor, diferindo estatisticamente dos demais. As plantas com *Parachlorella* sp., *B. subtilis* e suas

combinações (T2, T3, T5, T6 e T7) mantiveram os valores de E superiores (acima de $1,0 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em comparação à CK e com *T. harzianum* também em DH (Figura 5C).

Observamos que as plantas irrigadas apresentaram valores de eficiência no uso da água (EUA) que não diferiram estatisticamente entre as inoculações nessa condição, mas que sob DH as plantas CK e aquelas com *Parachlorella* sp. e *T. harizuanum* foram maiores, e os demais nessa condição foram semelhantes estatisticamente, exceto *Parachlorella* sp. + *T. harzianum*, aos observados nas plantas irrigadas (Figura 5D).

4.1.3. Aspecto Visual das Plantas

De modo geral as plantas expostas ao DH foram afetadas negativamente em comparação as irrigadas, pois apresentaram características fenotípicas que sugerem sensibilidade a essa condição estressante, evidenciada por intensa clorose foliar, redução no porte e sinais de senescência precoce (Figura 6). Em contrapartida, sob DH, a inoculação da microalga e as associações de *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* e *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* mantiveram os aspectos de coloração e turgescência, especialmente a microalga isolada.

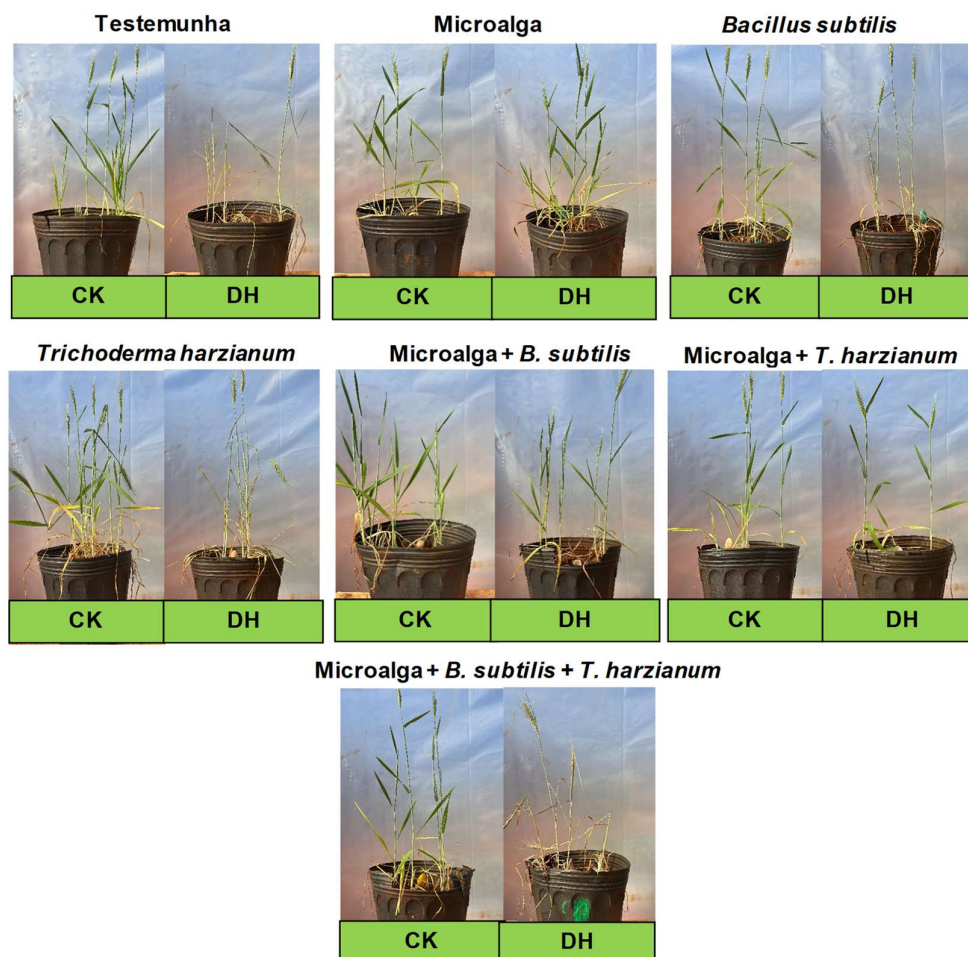


FIGURA 6. Aspecto visual das plantas de trigo provenientes da inoculação com diferentes bioinsumos isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, um dia após a avaliação da fase de estresse. UFGD, Dourados – MS, 2025. CK: controle irrigado. DH: déficit hídrico

4.2. Fase Pós-Estresse

4.2.1. Trocas Gasosas

A taxa de assimilação de CO_2 (A) variou entre os tratamentos, especialmente sob condições de déficit hídrico. As plantas irrigadas mantiveram valores de A elevados, não diferindo estatisticamente entre as inoculações nessa condição, exceto no tratamento *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, que apresentou menor valor (Figura 7A). Nas plantas previamente expostas ao DH, embora os valores de A tenham aumentado nas plantas CK e com *T. harzianum* no pós-estresse (1,35 e 1,05 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente), esses ainda continuaram sendo inferiores as plantas com as demais inoculações nessa condição. Ainda, nas

plantas previamente expostas ao DH, todas as inoculações, exceto com *B. subtilis*, apresentaram valores ($> 2,50 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) que não diferiram estatisticamente das plantas na condição irrigada (Figura 7A).

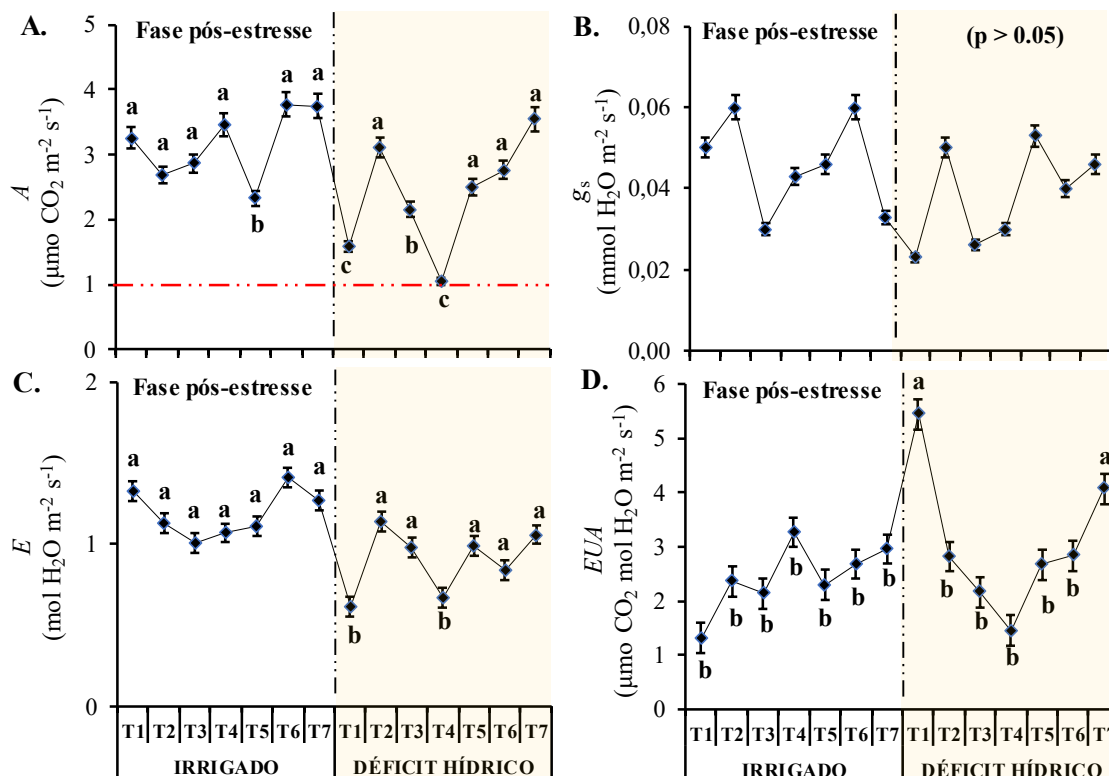


FIGURA 7. Taxa de assimilação de CO_2 – A (A), condutância estomática – g_s (B), transpiração – E (C) e eficiência no uso d'água – EUA (D) em folhas de trigo cv. Gralha azul provenientes de sementes inoculadas com bioinsumo isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, na fase de pós-estresse. UFGD, Dourados – MS, 2025. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05 \pm$ erro padrão). T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*.

Os valores de g_s não variaram estatisticamente em função dos ($p > 0,05$) (Figura 7B). Diante do exposto, notamos numericamente tendência de redução em alguns tratamentos nas plantas previamente expostas ao DH, como por exemplo o CK (T1) (Figura 7B). Para E , na condição irrigada não houve diferença estatística entre os tratamentos, enquanto que as plantas CK e *T. harzianum* previamente sob DH apresentaram menores valores, diferindo dos demais, os quais não diferiram das plantas irrigadas (Figura 7C). Em relação a EUA os maiores valores

ocorreram nas plantas CK e com *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*, respectivamente (Figura 7D), diferindo de todos os outros tratamentos.

4.2.2. Aspecto Visual das Espigas

As espigas das plantas irrigadas, *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* (T5) e *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum* (T7), apresentam tamanho reduzido e baixa densidade de grãos em comparação aos demais tratamentos (Figura 8). Nas plantas previamente expostas ao DH, todas espigas tiveram menor tamanho em comparação as irrigadas.



FIGURA 8. Aspecto visual das espigas de plantas de trigo provenientes de sementes inoculadas com bioinsumos isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, ao final da fase pós-estresse. UFGD, Dourados – MS, 2025. T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*.

Os valores de massa seca de raiz e o peso de mil grãos não foram influenciados pelos tratamentos ($p > 0,05$).

4.3. Plasticidade Fenotípica e Índice de Similaridade

Os maiores valores de IPF para MDA e fotossíntese na fase estresse e pós-estresse foram observados nas plantas CK e com *T. harzianum* (T1 e T4, respectivamente) em comparação aos

demaís tratamentos (Figura 9). Para MDA e *A* na fase de estresse o padrão de resposta das plantas com *Parachlorella* sp. e *B. subtilis* foram semelhantes, com baixos valores de IPF em comparação com CK (sem inoculação, T1).

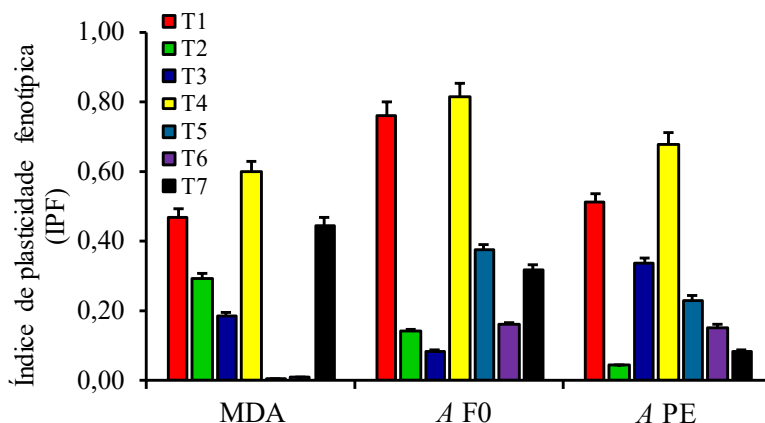


FIGURA 9. Índice de plasticidade fenotípica (IPF) para malondialdeído (MDA) e taxa fotossintética (*A*) na fase de estresse (F0) e pós-estresse (PE) em folhas de trigo proveniente de sementes inoculadas com bioinsumos isolados ou associados e submetidas ao déficit hídrico. UFGD, Dourados – MS, 2025. T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*.

Na análise de agrupamento pela distância Euclidiana (coeficiente de cofenética: 0,91), observamos que as plantas sem inoculação (T1: DH) e com *T. harzianum* (T4: DH) expostas ao déficit hídrico formaram um grupo distante dos demais tratamentos, especialmente do irrigado sem inoculação (T1 CK) (Figura 10). Por outro lado, as plantas cultivadas mesmo em DH mas inoculadas com *B. subtilis*, *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e *Parachlorella* sp. (T3, T6 e T2, respectivamente) apresentaram maior proximidade com T1 CK, ou seja, menor distância Euclidiana (Figura 10).

Além disso, as plantas com os tratamentos associados (T5, T6 e T7) tanto irrigados quanto em DH apresentaram maior proximidade entre si, formando grupos mais coesos e situando-se em regiões intermediárias do dendrograma. Entretanto, as inoculações isoladas com *Parachlorella* sp. e com *B. subtilis* apresentaram agrupamentos próximos entre as condições de déficit hídrico e irrigada, porém inferior quando comparado aos que tem associação de bioinsumos.

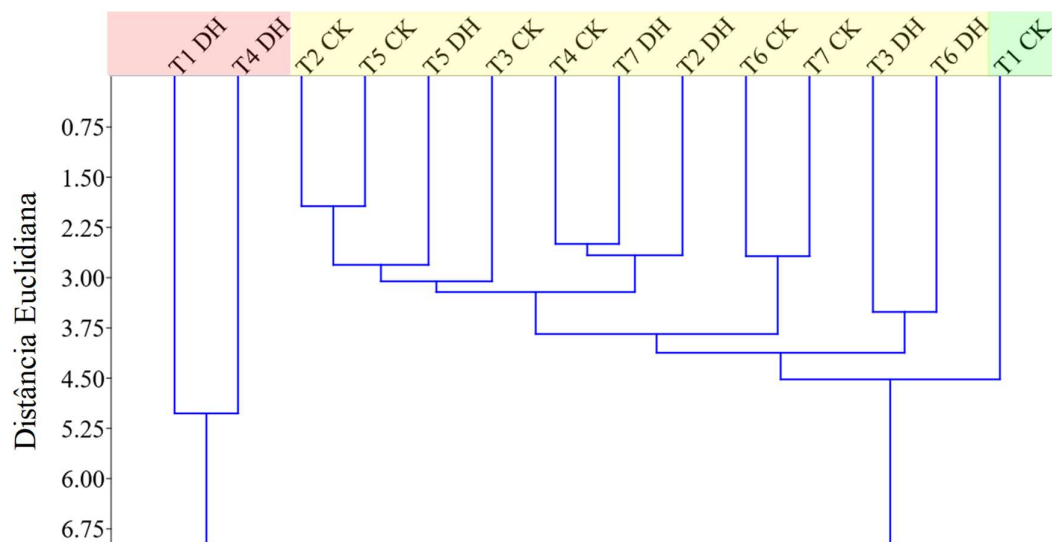


FIGURA 10. Dendrograma de similaridade pelos grupos hierárquicos baseado na distância Euclidiana para as características do trigo proveniente de sementes inoculadas com bioinsumos isolados ou associados e submetidas a diferentes regimes hídricos, avaliado na fase de estresse e pós-estresse. T1: controle (sem bioinsumos), T2: microalga *Parachlorella* sp., T3: *Bacillus subtilis*, T4: *Trichoderma harzianum*, T5: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, T6: *Parachlorella* sp. + *T. harzianum* e T7: *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*. CK: irrigado, DH: déficit hídrico

5. DISCUSSÃO

O trigo é sensível ao déficit hídrico, apresentando alterações fisiológicas e bioquímicas durante e após o estresse. Nesse contexto, observou-se aumento do conteúdo de H_2O_2 e MDA e redução da fotossíntese em algumas plantas sob estresse. Por outro lado, algumas inoculações — especialmente com *B. subtilis* e a microalga *Parachlorella* sp., isoladas ou combinadas, incluindo combinações com *T. harzianum* — auxiliaram na manutenção da taxa fotossintética (A) e da condutância estomática (gs), associadas à redução de EROs e peroxidação lipídica, indicando alívio do estresse oxidativo e confirmando nossa hipótese inicial. Associamos as respostas positivas dos bioinsumos ao seu potencial de ativação antecipada para preparação ao estresse, a qual denominamos “indução de sinalização bioquímica e/ou fisiológica – ISBF”. Na fase pós-estresse os valores de trocas gasosas em tratamentos com os bioinsumos se mantiveram ou elevaram, indicando uma recuperação de maneira mais eficiente.

De modo geral, foi possível compreender de forma mais ampla os mecanismos de ação de cada microrganismo que refletem em seu papel funcional na mitigação dos efeitos do estresse abiótico, destacando-se os efeitos benéficos das inoculações de *Parachlorella* sp. e *B. subtilis*, conforme também observado em trabalhos de Lastochkina et al. (2020), Lastochkina et al. (2023) e Kusvuran et al. (2021). Segundo esses autores, a inoculação de *B. subtilis* e microalga resultaram em diversos benefícios às plantas, como manutenção fisiológica, e hídrica, diminuindo a peroxidação lipídica.

No que se refere às proteínas, os menores valores observados nas plantas tratadas com bioinsumos sob irrigação podem estar associados ao redirecionamento energético e à ativação de vias de defesa. Por outro lado, o aumento geral de proteínas em plantas submetidas à deficiência hídrica pode representar uma estratégia de proteção. Sob estresse, como a seca, ocorre a síntese de proteínas de choque térmico (HSPs), como HSP90, HSP70 e HSP60, que participam da manutenção de proteínas sinalizadoras, do dobramento e desdobramento de proteínas e da proteção contra desnaturação proteica (Biffi et al., 2024). Além disso, esses mecanismos aumentam a estabilidade das membranas e reduzem os efeitos nocivos das espécies reativas de oxigênio (ERO), contribuindo para a estabilidade fisiológica da planta e desempenhando papel fundamental na tolerância a estresses hídrico, oxidativo e outros bióticos e abióticos (Ul Haq et al., 2019).

Sob deficiência hídrica, o estresse oxidativo ocorre quando há desequilíbrio entre compostos oxidantes e antioxidantes, em fator de uma alta produção de forma acelerada de ERO, induzidos por condições estressantes do ambiente, conforme observado em nosso estudo pelo aumento exacerbado de H_2O_2 . Dentre essas ERO, podem se destacar peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radicais superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$) e radical hidroxila (OH) (Guimarães et al., 2022; Hasanuzzaman et al., 2022).

O aumento do conteúdo de H_2O_2 em plantas submetidas a déficit hídrico, especialmente naquelas sem bioinsumos ou apenas com *T. harzianum*, ocorre devido ao estresse oxidativo causado pela limitação hídrica. Esse estresse pode saturar o sistema de transporte de elétrons, fazendo com que elétrons se liguem a O_2 e H^+ , promovendo a superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROs) (Carvalho e Neto et al., 2016). A presença excessiva de EROs compromete a integridade das membranas celulares, resultando em extravasamento de eletrólitos (Zhang et al., 2022; Silva et al., 2023; Khan et al., 2022; Costa et al., 2024). Essa resposta leva à peroxidação lipídica, indicada pelo aumento do conteúdo de MDA, prejudicando a funcionalidade do aparato fotossintético, como observado em nosso estudo com trigo, e impactando negativamente a fotossíntese.

O MDA é utilizado como marcador bioquímico de estresse na planta, esse composto é um dos principais produtos finais do processo de peroxidação lipídica que causa danos estruturais às membranas (Barbosa et al., 2023). Outro ponto a ser destacado é que o aumento de MDA nas plantas com *T. harzianum* sob déficit hídrico esteja associado a outras ERO não determinadas em nosso estudo, pois o conteúdo de H_2O_2 não foi tão expressivo ao passo de acompanhar a peroxidação lipídica.

Ainda em relação ao H_2O_2 , embora seja uma espécie reativa de oxigênio (ERO), em pequenas concentrações ele pode ser benéfico, atuando como sinalizador de estresse e induzindo a ativação de mecanismos antioxidantes para proteção da planta (Kumar et al., 2023; El-Sharkawy et al., 2025). No entanto, quando ocorre sua superprodução, o H_2O_2 provoca danos às membranas celulares, comprometendo sua integridade e podendo causar perda de solutos, como a prolina (Kokebie et al., 2024). Vale ressaltar que a resposta da planta pode variar de acordo com as condições de cultivo e a intensidade do estresse.

Por exemplo, na condição irrigada houve aumento de H_2O_2 nas plantas com microalga *Parachlorella* sp. e *T. harzianum*, inclusive maiores níveis do que as sob déficit hídrico. Levantamos o seguinte questionamento: essas plantas mesmo irrigadas mas com esses

bioinsumos estão estressadas? Embora tenha sido observada elevação nos teores de H_2O_2 nesses tratamentos, não foi acompanhado pelo aumento de MDA nem redução da taxa fotossintética, o que sugere que o aumento dessa ERO não promoveu danos oxidativos, mas sim a uma resposta adaptativa, podendo indicar uma sinalização de ativação do sistema antioxidante promovida pelos bioinsumos.

Por outro lado, na condição de DH as plantas com *Parachlorella* sp. e *B. subtilis* apresentaram menores níveis de MDA, demonstrando papel desses bioinsumos em aliviar a peroxidação de lipídeos. Essa redução pode ser explicada pelo fato de que microalgas do gênero *Chlorella* sp., próxima a *Parachlorella* em nosso estudo, e o *Bacillus* spp. produzem e/ou liberam compostos bioativos que participam nas rotas de defesa ativando diferentes mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, sendo eles SOD, CAT e POD ou ascorbato, glutatona, prolina ou compostos fenólicos e flavonoides (Fonseca et al., 2022; Parmar et al., 2023; Moon et al., 2024), atuando diretamente ou indiretamente nas rotas de defesa e indução da tolerância.

Similarmente, Lastochkina et al. (2020) observaram diminuição no conteúdo de MDA em aproximadamente duas vezes quando inoculadas com *Bacillus subtilis*. Alguns autores associam a mitigação da peroxidação lipídica com esse grupo de bactéria pela ativação do sistema antioxidante, como a atividade de enzimas SOD, POD e CAT (Siddika et al., 2024).

Em geral, a maior atividade de SOD nas plantas não inoculadas e expostas ao déficit hídrico em comparação as irrigadas é uma estratégia de aliviar os efeitos do estresse oxidativo. Isso porque a SOD catalisa a dismutação de $O_2^{\cdot-}$ em H_2O_2 e oxigênio (Mishra et al., 2023), mas vale ressaltar que mesmo aumentando a SOD nas plantas em DH sem bioinsumos e aquelas com *T. harzianum* e *Parachlorella* sp. + *B. subtilis* + *T. harzianum*, o aumento de MDA nessas plantas aumentaram de maneira pronunciada, evidenciando que não mitigou a peroxidação lipídica. Entretanto, os tratamentos com bioinsumos, exceto *T. harzianum* isolado, mantiveram os valores de *A* um pouco mais elevados, demonstrando que outras vias também foram ativadas mesmo não sendo determinados em nosso estudo.

Os melhores resultados das trocas gasosas nas plantas com a presença da microalga *Parachlorella* sp. isolada ou associada, por exemplo, podem estar associado a sua constituição de biomassa, na qual contém elevados teores de prolina, valina, cisteína (dados não apresentados), aminoácidos que atuam na osmorregulação, e podem ter atuado na estabilidade hídrica, mantendo os valores normalizados de *A*.

Em contrapartida, o aumento da SOD nas plantas com *Parachlorella* sp. e *B. subtilis* em DH embora semelhante estatisticamente ao CK contribuiu em aliviar o conteúdo de H_2O_2 . Além disso, associamos o efeito mitigador desses bioinsumos pela ação conjunta da SOD e POD, sugerindo um sistema antioxidante mais eficiente e menos sobrecarregado, uma vez que, as duas enzimas e outros osmólitos estão atuando na desintoxicação das ERO. Similarmente, em estudo realizado por Fonseca et al. (2022) em plantas de cana-de-açúcar inoculadas com *B. subtilis*, observou-se redução de SOD, POD e prolina, indicando uma condição menos estressante, as quais reduziram os impactos negativos dos danos oxidativos, aumentando a taxa fotossintética e *EUA*, o que corrobora com os resultados obtidos no nosso.

A redução dos valores de *A* sob déficit hídrico ocorreu devido ao fato de que nessa condição ocorre sinalização hormonal e ajustes de transpiração. Liu et al. (2022) descrevem que na exposição a deficiência hídrica ocorre aumento de ABA na raiz, o qual é sinalizado para parte aérea, atuando no fechamento estomático. Em nosso estudo, em DH houve menor *E* como mecanismo de evitar a perda excessiva de água, mas ao mesmo tempo reduziu a g_s , o que dificulta a entrada de CO_2 , limitando a fotossíntese.

Ressaltamos ainda que o decréscimo da *A*, especialmente das plantas de trigo sem bioinsumos e aquelas com *T. harzianum*, pode ser explicado pelo aumento acentuado de H_2O_2 , o que refletiu em MDA, indicando danos ao aparato fotossintético e sua funcionalidade, conforme também observado por Illescas et al. (2022) e Sah et al. (2025). Entretanto, a manutenção fisiológica com os demais bioinsumos mesmo em DH é reflexo dos efeitos benéficos que esses agentes promovem, sugerindo indução da tolerância a seca.

Essas respostas se devem ao uso eficiente da água e as atividades enzimáticas como a POD e SOD determinados em nosso estudo conforme supracitado anteriormente, mas também outras como a catalase, ascorbato peroxidase, outros compostos não enzimáticos e hormônios, os quais não foram avaliados. Por exemplo, segundo Vasconcelos et al. (2025) o *B. subtilis* é capaz de sintetizar hormônios vegetais como ácido indolacético (AIA) e melatonina, que regulam a abertura estomática, melhoram a eficiência no uso da água e promovem o crescimento radicular, facilitando a absorção de água e nutrientes.

Nas plantas inoculadas com *Trichoderma* spp., os elevados valores de atividade da POD, acompanhados por altas concentrações de malondialdeído (MDA), indicam que, embora o microrganismo tenha promovido a indução da atividade antioxidante, essa resposta não foi suficiente e eficiente para a completa desintoxicação das ERO. Contudo, observamos efeitos

positivos do *T. harzianum* quando é associado a outros bioinsumos, resultando em menores teores de MDA e, consequentemente, maior eficiência no controle dos danos oxidativos, sugerindo efeito positivo e sinérgico.

A pouca variação para A em função dos bioinsumos na condição irrigada se deve ao fato de todas as plantas estarem em condições ótimas. Destacamos que embora sem diferença estatística houve tendência de aumento dos valores de A em função da melhor *EUA* com os bioinsumos. Ainda, embora tenha ocorrido redução dos valores de g_s e E nessa condição, não chegou a influenciar os valores de A .

Após retomada da irrigação, plantas inoculadas com *Parachlorella* sp., *B. subtilis* e as combinações, apresentaram recuperação mais rápida dos valores de A , g_s e *EUA*, indicando maior capacidade de retomada da atividade fotossintética. Essa resposta pode ser atribuída à proteção do aparato fotossintético e à manutenção do turgor foliar, resultantes da ação bioestimulante dos inoculantes (Parmar et al., 2023; Moon et al., 2024). A recuperação dos parâmetros fisiológicos na fase pós-estresse reforça o potencial dos bioinsumos em conferir resiliência e memória fisiológica adaptativa, aspecto intrínseco da planta, mas que a inoculação atua de maneira mais eficiente e rápida.

Associamos os resultados benéficos do alívio estresse oxidativo a função *priming* dos bioinsumos, o qual reflete em um sistema de defesa eficiente. O efeito *priming* em plantas refere-se a um estado fisiológico induzido por um sinal que não ativa plenamente as defesas de imediato, mas prepara a planta para responder de forma mais rápida e/ou mais intensa a um estressor subsequente; essa preparação envolve alterações fisiológicas, transcricionais, metabólicas e epigenéticas que funcionam como uma “memória” celular (Mauch-Mani et al., 2017; Hilker; Schmülling, 2019), reforçando o papel dos bioinsumos na ISBF no trigo.

Ainda, esses autores descrevem que essa memória pode ser duradoura e, em alguns casos, até hereditária, o que a torna uma estratégia promissora para melhorar a resistência e a tolerância das culturas sem os altos custos associados a defesas constitutivas. Essas informações corroboram com as observadas em nosso estudo, pois associamos que a inoculação dos bioinsumos nas sementes foi uma maneira efetiva de ativação prévia do metabolismo de proteção, facilitando sua completa ativação mais rapidamente durante a exposição ao estresse.

O aumento dos valores de IPF para MDA e A nas plantas não inoculadas e com *T. harzianum* indica maior nível de sensibilidade ao estresse por deficiência hídrica, pois nesses tratamentos precisaram se ajustar mais para assegurar sua sobrevivência. Por outro lado, os

menores valores dessas características nas demais condições reforça o papel mitigador das inoculações, isto é, precisando realizar menos ajustes fisiológicos, possivelmente pela homeostase fisiológica, a qual refletiu melhor tolerância a essa condição adversa.

De forma geral, o efeito da *Parachlorella* sp., e do *B. subtilis* em aliviar o estresse oxidativo foi confirmado pelo dendograma de similaridade e próximos ao controle irrigado, o qual mantiveram a estabilidade fisiológica e ainda favoreceu a recuperação fotossintética após o estresse. Reforçando, esses achados estão alinhados com estudos recentes que destacam o potencial do uso de bioinsumos como estratégia sustentável para aumentar a tolerância aos fatores estressores como o hídrico (Fonseca et al., 2022) e salino (Silva et al., 2024).

A partir dos resultados observados em nosso estudo, a utilização desses agentes biológicos visa permitir que o trigo mantenha bom desempenho produtivo, mesmo sob condições de déficit hídrico, reduzindo as perdas associadas à escassez de água. Além disso, destaca-se a importância de aprofundar as pesquisas relacionadas à repetição de ciclos de estresse ao longo do desenvolvimento da cultura e avaliação de outras vias de defesa, para otimizar as respostas fisiológicas induzidas pelos bioinsumos.

Do ponto de vista prático, nosso trabalho poderá auxiliar na adoção de estratégias biológicas que favoreçam a indução de sinalização bioquímica e/ou fisiológica, possibilitando maior estabilidade produtiva em ambientes sujeitos à variabilidade climática e contribuindo para a segurança alimentar e a sustentabilidade da produção de trigo.

6. CONCLUSÃO

A inoculação de sementes de trigo com os bioinsumos *Parachlorella* sp. e *Bacillus subtilis*, isolados ou combinados, atenuou os efeitos do déficit hídrico durante e após o estresse. Esse efeito foi evidenciado pela redução dos conteúdos de malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), resultante da ativação de um sistema antioxidante eficiente, que também contribuiu para a manutenção das trocas gasosas das plantas.

O tratamento com *Trichoderma harzianum* isolado apresentou baixa eficiência na mitigação e recuperação do estresse, apesar de estimular a atividade antioxidante. Em contrapartida, as associações de bioinsumos, especialmente *Parachlorella* sp. + *B. subtilis*, demonstraram efeito sinérgico, promovendo maior resiliência e vigor das plantas sob déficit hídrico. Esses resultados reforçam o potencial do uso integrado de bioinsumos como estratégia sustentável para aumentar a tolerância do trigo ao estresse hídrico, por meio da sinalização bioquímica e fisiológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, M. K. et al. Isolation of plant growth promoting rhizobacteria from wheat rhizosphere and their effect on improving growth, yield and nutrient uptake of plants. **Plant Biosystems**, v. 145, n. 1, p. 159-168, 2011.
- AHMAD, M. et al. Integrated use of plant growth promoting rhizobacteria, biogas slurry and chemical nitrogen for sustainable production of maize under salt-affected conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v. 46, n. 1, p. 375-382, 2014.
- ALEXIEVA, V. et al. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001.
- ALMEIDA, B. H. et al. Evaluation of fungicides and *Trichoderma* spp. for controlling soil-borne fungal pathogens in melon crops. **Revista Caatinga**, v. 37, e12462, 2024.
- ALOTAIBI, Modhi O. et al. Enhancing water productivity and wheat (*Triticum aestivum* L.) production through applying different irrigation manners. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 331, 2025.
- AL-TAMMAR, Fatimah K.; KHALIFA, A. Y. Z. Plant growth promoting bacteria drive food security. **Brazilian journal of biology**, v. 82, p. e267257, 2022.
- ALVAREZ, Adriana L. et al. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. **Algal Research**, v. 54, p. 102200, 2021.
- DOS ANJOS ANTONINI, Jorge Cesar et al. Winter wheat irrigation parameters in the Brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, v. 18, n. 2, p. 99-106, 2024.
- ANTONIO, G. L. & FIRMINO, A. C. Antagonistic potential of *Trichoderma harzianum* and *Purpureocillium lilacinum* on *Ceratocystis fimbriata* in soil cultivated with eucalyptus. **Summa Phytopathologica**, v. 50, e263714, 2024.
- PADRÓ, Maria D. Arias et al. Effect of *Bacillus subtilis* on antioxidant enzyme activities in tomato grafting. **PeerJ**, v. 9, p. e10984, 2021.

BARBOSA, Marta Ribeiro; DE SOUZA, Lindomar Maria; NASCIMENTO, Katarina Romênia Pinheiro. ROS e o estresse oxidativo por seca em plantas. **Multidisciplinary Sciences Reports**, v. 3, n. 3, 2023.

BELLO, Adewale Suraj; SAADAOUI, Imen; BEN-HAMADOU, Radhouane. “Beyond the source of bioenergy”: microalgae in modern agriculture as a biostimulant, biofertilizer, and anti-abiotic stress. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1610, 2021.

BI, Yanpeng et al. Effects of *Bacillus subtilis* on cotton physiology and growth under water and salt stress. **Agricultural Water Management**, v. 303, p. 109038, 2024.

Biffi, Felipe Leme. Proteínas de choque térmico nas respostas das plantas ao estresse por calor: uma breve investigação. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2024.

BLAKE, Christopher; CHRISTENSEN, Mathilde Nordgaard; KOVÁCS, Ákos T. Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 34, n. 1, p. 15-25, 2021.

BROETTO, F. Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas. **Coordenador: Fernando Broetto-Botucatu: IBB, Cultura. Acadêmica**, 2014.

ÇAKIRSOY, I. et al. Physiology of microalgae and their application to agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1005991, 2022.

CALVO, P. et al. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and soil**, v. 383, p. 3-41, 2014.

CARVALHO FILHO, M. R. et al. Avaliação de isolados de *Trichoderma* na promoção de crescimento, produção de ácido indolacético in vitro e colonização endofítica de mudas de eucalipto. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 226, 2008.

CARVALHO, Victoria; NETO, Antônio Azeredo Coutinho. Espécies reativas de oxigênio em plantas. **Laboratório de Ensino de Botânica**, v. 161, 2016.

COSTA, A. L. et al. Application of *Trichoderma harzianum* enhances antioxidant defense and photosynthetic efficiency in wheat under drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1410205, 2024.

CUNHA, G. R. da; MALUF, J. R. T.; HAAS, J. C.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M. **Regionalização climática e suas implicações para o potencial de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 23 p. html (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 11). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_bp11.htm

DA SILVA, Dobyas Maclen Marques et al. Seed biopriming with *Parachlorella*, *Bacillus subtilis*, and *Trichoderma harzianum* alleviates the effects of salinity in soybean. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 1, p. 1149, 2024.

DA SILVA, Fábio Cesar. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2009.

DA SILVA, Thiago Antonio; et al. Morfologia, crescimento e desenvolvimento de trigo. In: **MANEJO AGRONÔMICO APLICADO ÀS CULTURAS DE PLANTAS DE LAVOURA I E II**. [S.l.]: Editora Pantanal, 2025. Disponível em: <https://editorapantanal.com.br/ebooks/2025/manejo-agronomico-aplicado-as-culturas-de-plantas-de-lavoura-i-e-ii/ebook.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2025.

DE OLIVEIRA, A. G. et al. Potencial de solubilização de fosfato e produção de AIA por *Trichoderma* spp. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 3, p. 26, 2012.

DOS SANTOS, Lorena Brito Pimentel Rodrigues et al. Beneficial plants - *Trichoderma* interactions on host tolerance to abiotic stresses: a meta-analysis. **Frontiers in Plant Physiology**, v. 3, p. 1569221, 2025.

DOS SANTOS, L. K. et al. Identification and quantification of phytohormones in microalgae biomass using HPLC-PDA. 2023.

DUAN, M. et al. Effects of *Bacillus subtilis* on carbon components and microbial functional metabolism during cow manure–straw composting. **Bioresource Technology**, v. 303, e122868, 2020.

EL-SHARKAWY, Hany HA et al. Enhancing *Trichoderma* efficacy in managing wheat stem rust disease and boosting production through the application of certain chemical inducers. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 562, 2025.

FANG, S. et al. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, e667458, 2021.

FELDMAN, M. Origin of cultivated wheat. **The world wheat book: a history of wheat breeding**, p. 3-53, 2001.

FERREIRA, Nathalia Calhabeu et al. *Bacillus subtilis* improves maize tolerance to salinity. **Ciência Rural**, v. 48, n. 8, p. e20170910, 2018.

FIORENTINO, Sofia et al. Effects of microalgae as biostimulants on plant growth, content of antioxidant molecules and total antioxidant capacity in *Chenopodium quinoa* exposed to salt stress. **Plants**, v. 14, n. 5, p. 781, 2025.

FONSECA, Mariley de Cássia da et al. *Bacillus subtilis* inoculation improves nutrient uptake and physiological activity in sugarcane under drought stress. **Microorganisms**, v. 10, n. 4, p. 809, 2022.

GALEANO, R. M. S. Isolamento, caracterização bioquímica e potencial de *Trichoderma* spp. para promoção de crescimento da soja. 2024.

GENG, Yueyao et al. Positive Role of *Trichoderma harzianum* in Increasing Plant Tolerance to Abiotic Stresses: A Review. **Antioxidants**, v. 14, n. 7, p. 807, 2025.

GIANNOPOLITIS, Constantine N.; RIES, Stanley K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

GONÇALVES, J. et al. Microalgas como biofertilizantes: uma forma sustentável de melhorar a fertilidade do solo. **Sustainability**, v. 15, n. 16, p. 12413, 2023.

GUERRA, Viviane S. et al. Análise das componentes hídricas, precipitação, evapotranspiração e umidade na superfície do solo representadas pelo Modelo Climático Regional Regcm3, para uma região de cultivo de soja. **Ciência e Natura**, p. 389-391, 2013.

GUIMARÃES, Miguel Julio Machado et al. Biochemical and physiological parameters and productivity of grain sorghum irrigated with saline water. 2022.

XU, Guoyi et al. Ecological effects of *B. subtilis* C3 in kiwifruit rhizosphere soil and its prevention and control against root rot disease. **Frontiers in Microbiology**, v. 16, p. 1623463, 2025.

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

HACHICHA, R. et al. Biomolecules from microalgae and cyanobacteria: Applications and market survey. **Applied Sciences**, v. 12, n. 4, e1924, 2022.

HAMID, Samina et al. *Bacillus subtilis* Y16 and biogas slurry enhanced potassium to sodium ratio and physiology of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to mitigate salt stress. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 29, p. 38637-38647, 2021.

HASANUZZAMAN, Mirza; FUJITA, Masayuki. Plant oxidative stress: biology, physiology and mitigation. **Plants**, v. 11, n. 9, p. 1185, 2022.

HASHEM, Abeer; TABASSUM, Baby; ABD_ALLAH, Elsayed Fathi. *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi journal of biological sciences**, v. 26, n. 6, p. 1291-1297, 2019.

HERMOSA, R. et al. Plant-beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. **Microbiology**, v. 158, n. 1, p. 17-25, 2012.

HILKER, Monika; SCHMÜLLING, Thomas. Stress priming, memory, and signalling in plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 42, n. 3, p. 753-761, 2019.

HOU, Y. et al. Effects of *Bacillus subtilis* on Evaporation of Soil Surface and Water and Salt Distribution in Saline-alkali Soil. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 32, n. 2, p. 306-311, 2018.

ILLESCAS, María et al. Effect of *Trichoderma asperellum* on wheat plants' biochemical and molecular responses, and yield under different water stress conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 12, p. 6782, 2022.

KHAN, Muhammad Arslan et al. Eco-friendly management of wheat stripe rust through application of *Bacillus subtilis* in combination with plant defense activators. **Journal of King Saud University-Science**, v. 35, n. 4, p. 102587, 2023.

KRIEGER-LISZKAY, Anja; SHIMAKAWA, Ginga. Regulation of the generation of reactive oxygen species during photosynthetic electron transport. **Biochemical Society Transactions**, v. 50, n. 2, p. 1025-1034, 2022.

KUMAR, Arun; SINGH, Jay Shankar. Microalgal bio-fertilizers. In: **Handbook of microalgae-based processes and products**. Academic Press, 2020. p. 445-463.

KUMAR, Dinesh et al. Modulation in the enzymatic antioxidants, MDA level and elicitation in conessine biomolecule in *Holarrhena pubescens* (medicinal tree) cultures exposed to different heavy metals: Ni, Co, Cr and As. **3 Biotech**, v. 13, n. 9, p. 307, 2023.

KURAMSHINA, Z. M.; KHAIRULLIN, R. M. Improving Salt Stress Tolerance of Plants with Endophytic Strains of *Bacillus subtilis*. **Fiziologîa rastenij**, v. 70, n. 3, p. 259-268, 2023.

KUSVURAN, Sebnem. Microalgae (*Chlorella vulgaris Beijerinck*) alleviates drought stress of broccoli plants by improving nutrient uptake, secondary metabolites, and antioxidative defense system. **Horticultural Plant Journal**, v. 7, n. 3, p. 221-231, 2021.

Lastochkina, Oksana et al. Seed Priming with Endophytic *Bacillus subtilis* Modulates Physiological Responses of Two Different *Triticum aestivum* L. Cultivars under Drought Stress. **Plants (Basel, Switzerland)** vol. 9,12 1810. 21 Dec. 2020.

LASTOCHKINA, Oksana et al. Effect of seed priming with endophytic *Bacillus subtilis* on some physio-biochemical parameters of two wheat varieties exposed to drought after selective herbicide application. **Plants**, v. 12, n. 8, p. 1724, 2023.

LEE, Sang-Moo; RYU, Choong-Min. Algae as new kids in the beneficial plant microbiome. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 599742, 2021.

LEVASSEUR, Wendie; PERRÉ, Patrick; POZZOBON, Victor. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. **Biotechnology advances**, v. 41, p. 107545, 2020.

LEVY, Avraham A.; FELDMAN, Moshe. Evolution and origin of bread wheat. **The Plant Cell**, v. 34, n. 7, p. 2549-2567, 2022.

LIMA, Natally Ferreira. Antioxidant responses of wheat populations under drought stress: an enzymatic perspective. 2024. 33 p. Dissertation (Master's in Genetics and Plant Breeding) - Federal University of Viçosa, Viçosa. 2024.

LIU, Hui et al. Signaling transduction of ABA, ROS, and Ca²⁺ in plant stomatal closure in response to drought. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 23, p. 14824, 2022.

MACHADO, Rafael Goulart et al. Promoção de crescimento de *Lotus corniculatus* L. e *Avena strigosa* Schreb pela inoculação conjunta de *Trichoderma harzianum* e rizóbio. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 111-126, 2011.

MARKS, E. et al. The biostimulating effects of viable microalgal cells applied to a calcareous soil: Increases in bacterial biomass, phosphorus scavenging, and precipitation of carbonates. **Science of the Total Environment**, v. 692, p. 784-790, 2019.

MAUCH-MANI, Brigitte et al. Defense priming: an adaptive part of induced resistance. **Annual review of plant biology**, v. 68, p. 485-512, 2017.

MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (org.). *Trichoderma: uso na agricultura*. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 536 p. ISBN 978-85-7035-943-8. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1117296>. Acesso em: 6 ago 2024.

MISHRA, Neelam et al. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1110622, 2023.

MOON, Jinyoung et al. Efeitos fisiológicos e mecanismos de *Chlorella vulgaris* como bioestimulante no crescimento e tolerância à seca de *Arabidopsis thaliana*. **Plants**, vol. 13, no. 21, p. 3012, 2024.

NASCIMENTO, V. C. et al. *Trichoderma*: eficiência no controle biológico e perspectivas para os estados do Centro-Oeste brasileiro e Tocantins. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e260161, 2022.

NICOLAI, Artur Bernardeli. Desempenho do trigo em função da aplicação de biorreguladores e déficit hídrico no início do florescimento. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11144/tde-04042024-150254/>. Acesso em: 06 out. 2025.

OLIVEIRA, A. G. et al. Potencial de solubilização de fosfato e produção de AIA por *Trichoderma* spp. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 7, n. 3, p. 149-155, 2012.

PARMAR, P. et al. Microalgae as next generation plant growth additives. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1073546, 2023.

PERNIOLA, Omar Salvador et al. Sinergia entre la biofumigación con mostaza india y el hongo antagonista *Trichoderma harzianum* para el control de *Phomopsis* spp., bajo condiciones in vitro. **Siembra**, v. 11, n. 2, 2024.

QUINTAS-NUNES, Francisco et al. Plant growth promotion, phytohormone production and genomics of the rhizosphere-associated microalga, *Micractinium rhizosphaerae* sp. nov. **Plants**, v. 12, n. 3, p. 651, 2023.

RIBEIRO, D. M. et al. A low-cost approach for *Chlorella sorokiniana* production through combined use of urea, ammonia and nitrate based fertilizers. **Bioresource Technology Reports**, v. 9, e100354, 2020.

SAH, Jay Karan et al. Enhancing physio biochemical traits and yield of common buckwheat *Fagopyrum esculentum* with rice husk biochar and nano iron oxide under water stress. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 7859, 2025.

SANTOS, D. et al. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 836-842, 2012.

SANTOS, Dércia et al. Oxidative Stress, Phytochemical Screening, and Antioxidant Activity on Microalgae (*Arthrospira platensis*) After Exposure to Glyphosate and Microplastics. **Journal of Xenobiotics**, v. 15, n. 4, p. 106, 2025.

SCHMITZ, Roberta; MAGRO, Clinei D.; COLLA, Luciane Maria. Aplicações ambientais de mivistacroalgas. **Re CIATEC-UPF**, v. 4, n. 1, p. 48-60, 2012.

SHAH, Shachi et al. Potential and prospect of plant growth promoting rhizobacteria in lentil. **Sci. Lentil Prod**, p. 431-451, 2018.

SIDDIKA, Ayesha et al. Harnessing plant growth-promoting rhizobacteria, *Bacillus subtilis* and *B. aryabhattai* to combat salt stress in rice: a study on the regulation of antioxidant defense, ion homeostasis, and photosynthetic parameters. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1419764, 2024.

SILVA, F. de L. Adaptabilidade e estabilidade de linhagens endogâmicas recombinantes de trigo sob estresse hídrico e térmico usando modelo AMMI. **Revista Biodiversidade**, v. 24, n. 1, p. 27-40, 2025.

SILVA, L. M. et al. Oxidative stress responses of wheat under water deficit and the mitigating role of microbial inoculants. **Plant Physiology Reports**, v. 28, p. 219–229, 2023.

SINGH, Ashutosh et al. A comprehensive review on greenhouse gas emissions in agriculture and evolving agricultural practices for climate resilience. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, n. 5, p. 455-464, 2024.

SMIDERLE, O. J. et al. Quality of *Mezilaurus itauba* seedlings inoculated with *Trichoderma harzianum* under doses of organomineral fertilizer from cupuaçu residues. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, e284144, 2024.

SOOD, M. et al. *Trichoderma*: the “secrets” of a multitasking biocontrol agent. **Plants** 9 (6): 762. 2020.

SOUZA, Carlos Cleide de et al. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 4, p. 338-342, 2000.

STEFFEN, Gersa Pauli Kist et al. *Trichoderma* controls plant-parasitic nematodes and increases soybean productivity. **Campos & Negócios**, 2018.

UL HAQ, Saeed et al. Heat shock proteins: dynamic biomolecules to counter plant biotic and abiotic stresses. **International journal of molecular sciences**, v. 20, n. 21, p. 5321, 2019.

VALLADARES, Fernando; SANCHEZ-GOMEZ, DAVID; ZAVALA, Miguel A. Quantitative estimation of phenotypic plasticity: bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications. **Journal of ecology**, v. 94, n. 6, p. 1103-1116, 2006.

VASCONCELOS, Julio Cezar Souza et al. Bacillus-Based Inoculants Enhance Drought Resilience in Soybean: Agronomic Performance and Remote Sensing Insights from Multi-Location Trials in Brazil. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1630127, 2025.

VICTOR, M. M. et al. MICROALGAS: UMA ESTRATÉGIA SUSTENTÁVEL NA TRANSFORMAÇÃO E OBTENÇÃO DE COMPOSTOS ORGÂNICOS. **Química Nova**, v. 47, n. 2, e-20230107, 2024.

VIEIRA, Pabline Marinho et al. Overexpression of an aquaglyceroporin gene from *Trichoderma harzianum* improves water-use efficiency and drought tolerance in *Nicotiana tabacum*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 121, p. 38-47, 2017.

YANG, Lu et al. Exogenous *Bacillus subtilis* can reduce the damage caused by waste drilling fluid to ryegrass (*Lolium perenne*). **Plant Stress**, v. 14, p. 100641, 2024.

ZHANG, H. et al. Reactive oxygen species metabolism and antioxidant responses in plants under drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 203, p. 105037, 2022.

ZOU, Meng et al. Effects of *Bacillus subtilis* on rose growth promotion and rhizosphere microbial community changes under saline–alkaline stress. **Agronomy**, v. 14, n. 4, p. 730, 2024.

ZUFFO, Alan Mario et al. Multivariate Adaptability of Tropical Wheat Cultivars to Drought and Salinity Stresses. **Plants**, v. 14, n. 7, p. 1021, 2025.