

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COMO ESTRATÉGIA
PARA MITIGAR ESTRESSES ABIÓTICOS NA CULTURA DO
TRIGO, SOB CONDIÇÕES DO ECÓTONO CERRADO-MATA
ATLÂNTICA**

DIJOVANO DAL CASTEL

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2025**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAR
ESTRESSES ABIÓTICOS NA CULTURA DO TRIGO, SOB CONDIÇÕES DO
ECÓTONO CERRADO-MATA ATLÂNTICA**

DIJOVANO DAL CASTEL
Engenheiro agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Munir Mauad

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Produção Vegetal para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

D136a	Dal Castel, Dijovano. Aplicação foliar de zinco como estratégia para mitigar estresses abióticos na cultura do trigo, sob condições do ecótono Cerrado-Mata Atlântica. / Dijovano Dal Castel. – Dourados, MS : UFGD, 2026. Orientador: Profº Drº Munir Mauad. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados. 1. <i>Triticum aestivum</i>. 2. Estresse oxidativo. 3. enzima antioxidante. 4. Mauad, Munir. I. Título.
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO COMO ESTRATÉGIA PARA MITIGAR ESTRESSES ABIÓTICOS NA CULTURA DO TRIGO, SOB CONDIÇÕES DO ECÓTONO CERRADO-MATA ATLÂNTICA

por

DIJOVANO DAL CASTEL

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em: 10/03/2026

Documento assinado digitalmente
 **MUNIR MAUAD**
Data: 27/05/2026 11:50:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Munir Mauad

Orientador

Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

Documento assinado digitalmente
 **CLEBERTON CORREIA SANTOS**
Data: 30/05/2026 11:04:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos

Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Documento assinado digitalmente
 **CLAUDEMIR ZUCARELI**
Data: 28/05/2026 10:58:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Claudemir Zucareli

Universidade Estadual de Londrina - UEL

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por nos conceder o dom da vida, e pela sua Graça e sabedoria, somos capacitados. Toda e qualquer obra produzida como fruto de nosso esforço, dedicação e empenho de conhecimento, deve servir para honrar o Senhor. Nada na nossa vida deve ser feito sem propósito, amor e boa vontade, pois tudo é para a glória de Deus, e Dele vêm todas as coisas.

Agradeço à minha esposa Joci Mara, por ser sempre parceira, apoiar e entender minhas decisões e seu incentivo. A minhas filhas Beatriz, Gabriela e Daniela, por terem me acompanhado e incentivado neste novo desafio.

Agradeço a meu orientador, Munir Mauad, pela parceria, ensino, paciência e ajuda na concepção e condução deste trabalho. Não haveria melhor pessoa para me orientar.

Todo corpo de colaboradores da Fazenda Experimental da COAMO, de Dourados/MS.

Todos os alunos de graduação que atuaram de qualquer forma na geração dos dados deste trabalho, em especial a Gabriel Augusto Silva Salmazo e Leonardo Gonçalves Nunes Lazarin.

À Universidade Federal da Grande Dourados e a CAPES.

SUMÁRIO

	PÁGINA
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Trigo	10
2.2 Estresses abióticos	11
2.3 Espécies Reativas de Oxigênio (ERO)	15
2.4 A importância do zinco (Zn)	16
3 MATERIAL E MÉTODOS	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

RESUMO

O Cerrado brasileiro, notadamente no Mato Grosso do Sul (MS), apresenta um cenário promissor para a expansão da triticultura, mas impõe desafios significativos devido à instabilidade hídrica e às elevadas temperaturas durante o ciclo de cultivo, fatores que induzem estresse abiótico e oxidativo na cultura. A adubação foliar surge como estratégia promissora para mitigação do efeito de estresse oxidativo. Nesse contexto, o zinco (Zn) merece destaque por ser reconhecido como micronutriente essencial às plantas, com atuação multifacetada no metabolismo (fotossíntese, metabolismo de carboidratos, síntese de proteínas, regulação do crescimento e desenvolvimento reprodutivo) e na defesa antioxidante. O objetivo foi avaliar o efeito da aplicação foliar de zinco (Zn) em diferentes estádios fenológicos como estratégia para mitigar estresses abióticos na cultura do trigo, sob condições do ecótono cerrado-mata atlântica. O experimento foi conduzido em Dourados, MS, durante dois anos agrícolas (2024 e 2025), em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, com sete tratamentos de aplicação foliar de Zn (100 g ha⁻¹), incluindo o controle (sem aplicação), aplicações únicas (nos estádios E2, E10 e E10.5.1) e aplicações parceladas (E2+E10, E2+E10.5.1 e E10+E10.5.1), utilizando os cultivares TBIO Calibre (2024) e TBIO Titan (2025). As variáveis analisadas foram: altura de plantas, comprimento de espiga, número de grãos por espiga, número de grão por espiguetas, número de espiguetas por espiga, massa de 1000 grãos, produtividade, peso hectolítrico, proteína, peroxidase e superóxido dismutase. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey (p<0,05). Os resultados da safra 2024, demonstram que as aplicações parceladas de Zn, em especial E2+E10 e E10+E10.5.1, promoveram incrementos nas características de rendimento, como maior altura de planta, comprimento de espiga, número de grãos por espiga e número de grão por espiguetas. Na safra 2025 não houve efeito significativo. A produtividade não apresentou efeito significativo dos tratamentos em ambas as safras, mas observamos um incremento de 20,38% (2024) e 8,68% (2025) na produtividade em relação ao controle. Em ambas as safras, o manejo parcelado resultou em maior atividade das enzimas antioxidantes Peroxidase e Superóxido Dismutase, com um aumento de 250% (2024), 33,33% (2025) e 10,47% (2024), 9,73% (2025) respectivamente, evidenciando a melhoria da estabilidade fisiológica da planta. A aplicação foliar parcelada de zinco, particularmente nos estádios E2+E10 e E10+E10.5.1, constitui uma estratégia eficaz para fortalecer o sistema antioxidante do trigo e otimizar o desempenho agrônomo, conferindo maior resiliência à cultura frente aos estresses abióticos típicos do Cerrado.

Palavras-chave: *Triticum aestivum*, estresse oxidativo, enzima antioxidante.

ABSTRACT

The Brazilian Cerrado, particularly in the state of Mato Grosso do Sul (MS), offers a promising landscape for the expansion of wheat cultivation; however, it poses significant challenges due to water instability and high temperatures during the growing cycle—factors that induce abiotic and oxidative stress in the crop. Foliar fertilization emerges as a promising strategy for mitigating the effects of oxidative stress. In this context, zinc (Zn) stands out as an essential micronutrient for plants, playing a multifaceted role in metabolism (photosynthesis, carbohydrate metabolism, protein synthesis, growth regulation, and reproductive development) and antioxidant defense. This study aimed to evaluate the effect of foliar zinc (Zn) application at different phenological stages as a strategy to mitigate abiotic stresses in wheat under the conditions of the Cerrado-Atlantic Forest ecotone. The experiment was conducted in Dourados, MS, over two growing seasons (2024 and 2025), using a randomized complete block design with four replications. Seven foliar Zn application treatments (100 g ha^{-1}) were evaluated, including a control (no application), single applications (at stages GS2, GS10, and GS10.5.1), and split applications (GS2+GS10, GS2+GS10.5.1, and GS10+GS10.5.1), utilizing the cultivars TBIO Calibre (2024) and TBIO Titan (2025). The variables analyzed included plant height, spike length, number of grains per spike, number of grains per spikelet, number of spikelets per spike, thousand-grain weight, grain yield, test weight, protein content, peroxidase, and superoxide dismutase. Data were subjected to analysis of variance and Tukey's test ($p < 0.05$). Results from the 2024 season demonstrated that split Zn applications—particularly GS2+GS10 and GS10+GS10.5.1—promoted increases in yield components, such as plant height, spike length, number of grains per spike, and number of grains per spikelet. No significant effects were observed in the 2025 season. Although grain yield did not show significant differences between treatments in either season, yield increments of 20.38% (2024) and 8.68% (2025) were observed relative to the control. In both seasons, split management resulted in higher activity of the antioxidant enzymes Peroxidase and Superoxide Dismutase, with increases of 250% (2024) and 33.33% (2025) for the former, and 10.47% (2024) and 9.73% (2025) for the latter, demonstrating improved physiological stability. It was concluded that split foliar zinc application, especially at stages GS2+GS10 and GS10+GS10.5.1, constitutes an effective strategy to strengthen the wheat antioxidant system and optimize agronomic performance, providing greater resilience to the abiotic stresses typical of the Cerrado.

Keywords: *Triticum aestivum*, oxidative stress, antioxidant enzyme.

INTRODUÇÃO

O trigo ocupa posição de destaque na agricultura brasileira não apenas pela complexidade da cadeia produtiva, mas também pelo papel relevante nas importações e, mais recentemente, nas exportações do país. Esses aspectos ressaltam a necessidade de intensificação das pesquisas sobre o trigo no Brasil, não apenas para reduzir a dependência das importações, mas também para expandir as exportações e fortalecer a competitividade do agronegócio nacional (EMBRAPA 2024).

Nesse contexto, diversos fatores influenciam o cultivo do trigo, como o aumento da demanda global por alimentos, a elevação da renda e das exigências de consumo, a abertura de novos mercados e a adoção de barreiras não-tarifárias por países desenvolvidos (SAATH et al., 2018).

O Cerrado, que ocupa aproximadamente 2.04 km² e representa 23,9% do território brasileiro, apresenta condições favoráveis para a expansão da cultura do trigo, seja em sistema de sequeiro ou irrigado. Suas características climáticas e edáficas diferem das regiões tradicionalmente cultivadas, tornando-se uma opção desafiadora, mas também uma alternativa viável para o crescimento da produção (GOMES et al., 2019). Embora o Mato Grosso do Sul possua condições favoráveis para o incremento da triticultura, seu cultivo atual é de aproximadamente 45 mil hectares, um contraste significativo com o final da década de 1980, quando o estado registrava mais de 400 mil hectares cultivados (IBGE, 2024; CONAB, 2023a; 2023b).

Dourados, no Mato Grosso do Sul, insere-se em uma região de ecótono entre o Cerrado e a Mata Atlântica, caracterizada pela sobreposição de elementos fitogeográficos de ambos os biomas (ZAVALA et al., 2017; SANGALLI et al., 2021). Conforme Oliveira-Filho e Fontes (2000), essas áreas de transição podem abranger centenas de quilômetros, exibindo vegetação diversificada, como campos limpos, extensas áreas de cerrados e manchas de matas tropicais, conforme observado em Dourados (IBGE, 2017; DOURADOS, 2019). A mescla de espécies que formam este ecótono torna complexa a identificação da vegetação predominante, exigindo vasto conhecimento florístico (IBGE, 2019). No município, a Mata Atlântica abrange aproximadamente 56,0% da área territorial (IBGE, 2012).

A região do cerrado apresenta estacionalidade das chuvas, caracterizando duas estações bem definidas: uma chuvosa, entre outubro e abril, quando ocorre geralmente

90% da precipitação pluvial anual, e uma estação seca, no período de maio a setembro, sendo que a precipitação pluvial média anual fica entre 1200 e 1800 mm. A época das secas caracteriza-se por grande evaporação e baixa umidade relativa do ar (MARCUIZZO et al., 2012). Durante a safra de trigo no Cerrado, realizado entre o período de maio a outubro, os índices pluviométricos são baixos, o que é característico da estação seca.

O cultivo do trigo no Cerrado pode ser integrado a sistemas de rotação de culturas, substituindo a tradicional alternância entre soja e milho safrinha, prática comum nos últimos anos, sendo predominante o sistema de sucessão soja verão/milho segunda safra, em Mato Grosso do Sul, com cerca de 60% das áreas cultivadas sob esse sistema (CONAB, 2023).

Entretanto, desafios como as mudanças climáticas afetam diretamente a produção, causando períodos de estiagem prolongada, conhecidos como "veranicos", além de altas temperaturas em estágios críticos do desenvolvimento das culturas, fatores que reduzem o rendimento agrícola (SOUSA et al., 2015). Conforme Gupta et al. (2020), a seca ou déficit hídrico é responsável por perdas anuais na produção agrícola superiores às causadas por todos os patógenos combinados.

A escassez de água é um dos principais fatores que limitam a produtividade agrícola, prejudicando o crescimento e o desenvolvimento das plantas (KOCH et al., 2019). O déficit hídrico compromete processos fisiológicos essenciais para a sobrevivência das culturas, reduzindo significativamente o potencial produtivo de diversas espécies agrícolas (ANSARI et al., 2019; CONTI et al., 2019).

O estresse hídrico inibe o crescimento do trigo e afeta diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento, levando a uma redução no rendimento da cultura (KHATIWADA et al., 2020). Além de impactar negativamente o crescimento, esse estresse provoca alterações morfológicas, como a redução da área foliar, já que sua expansão está diretamente ligada à pressão de turgescência, dependente do potencial hídrico. Além desses fatores ocorrem fechamento dos estômatos, envelhecimento precoce e queda das folhas, fatores que comprometem o desenvolvimento pleno da planta (ANJUM et al. 2011, BANDURSKA, 2022).

Situações de estresse também prejudicam o funcionamento enzimático das células, desta maneira, aumentando a geração de Espécies Reativas de Oxigênio (ERO), desencadeando um quadro de estresse oxidativo (APEL e HIRT, 2004). As ERO afetam vários componentes celulares, como proteínas, DNA, RNA e os lipídios, ocasionando a

oxidação. Seu acúmulo compromete o funcionamento fisiológico das células, ocasionando danos à membrana citoplasmática e às organelas (FOYER, 2018)

O Zinco (Zn) é um micronutriente essencial que atua na fotossíntese, respiração e síntese de proteínas, amido, hormônios de crescimento e está relacionado à defesa antioxidante das plantas. Ele está presente na estrutura da enzima superóxido dismutase (Cu/Zn-SOD), responsável por converter o radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que por sua vez é transformado em água e oxigênio por meio da ação da peroxidase do ascorbato (APX) (ASADA, 1999; TAVANTI et al., 2021; FARHAD et al., 2023).

Considerando as condições climáticas do Cerrado, hipotetizamos neste trabalho que a aplicação de zinco em diferentes estádios fenológicos do trigo, poderá mitigar os efeitos do estresse abiótico durante seu ciclo de cultivo, ativando respostas fisiológicas de proteção e mantendo o crescimento, desenvolvimento, componentes de produção e a produtividade de grãos.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da aplicação foliar de zinco (Zn) em diferentes estádios fenológicos, de forma isolada ou sequencial, como estratégia para mitigar estresses abióticos na cultura do trigo, sob condições do ecótono cerrado-mata atlântica.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Trigo

Botanicamente, o trigo é uma planta herbácea pertencente à classe Liliopsida (Monocotiledônea), família Poaceae, tribo Triticeae (TRACE, 2021). Essa gramínea apresenta ampla plasticidade edafoclimática, sendo cultivada em diferentes zonas agroecológicas, desde regiões áridas do Oriente Médio até áreas com elevados índices pluviométricos, como as encontradas na China e na Índia (FORNASIERI FILHO, 2008; CONAB, 2021).

O trigo (*Triticum aestivum* L.) destaca-se como a segunda cultura agrícola mais cultivada no mundo, abrangendo uma área estimada em aproximadamente 221,6 milhões de hectares (USDA, 2025). Além de sua ampla distribuição geográfica, esse cereal representa uma importante fonte nutricional para a população global, contribuindo com cerca de 19% da ingestão calórica total, principalmente devido ao seu elevado teor de carboidratos e ao conteúdo proteico superior quando comparado a outras gramíneas, como arroz, milho e centeio (LIU et al., 2016; ZÖRB et al., 2018).

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2025), os maiores produtores mundiais de trigo incluem a China, com 140,10 milhões de toneladas, a União Europeia, com 122,15 milhões de toneladas, a Índia, com 113,29 milhões de toneladas, a Rússia, com 81,6 milhões de toneladas, e os Estados Unidos, que produziram 53,85 milhões de toneladas. O Brasil ocupa a 16ª posição na produção mundial segundo levantamento da USDA (2025), não sendo autossuficiente em sua produção.

No Brasil, o cultivo do trigo se estende desde a região Sul até os cerrados do Brasil Central. Os estados que mais se destacam na produção são Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Bahia, com a região Sul sendo responsável por 90% da produção nacional (CONAB, 2021). A safra 2024/25 alcançou 7,54 milhões de toneladas, cultivadas em 2,45 milhões de hectares, com produtividade média de 3.077 kg.ha⁻¹ (CONAB, 2025).

Para o adequado desenvolvimento da cultura, determinadas condições de temperatura e precipitação pluvial são necessárias ao longo do ciclo fenológico. O requerimento hídrico durante o ciclo de cultivo varia entre 450 a 650 mm, sendo que esses

valores podem oscilar de acordo com o clima e duração do ciclo (DOORENBOS E KASSAM, 1979; RODRIGUES et al., 2011; FAO, 2026)

Durante a emergência, a temperatura ideal do solo situa-se em torno de 15 °C, com precipitações acumuladas entre 120 e 200 mm. No perfilhamento e início do espigamento, as temperaturas variam de 8 a 18 °C, acompanhadas de chuvas mensais de aproximadamente 40 mm. Já no espigamento, são desejáveis temperaturas médias próximas a 18 °C e precipitações inferiores a 60 mm/mês, em condições sem geadas ou ventos intensos (WHITE, 2006). Podemos considerar que a temperatura ideal para o desenvolvimento da cultura varia entre 15 a 25°C (MANFRON et al.,1993; PORTER & GAWITH,1999; KHAN et al., 2021).

Embora a cultura do trigo apresente relativa tolerância a variações na disponibilidade hídrica, sua sensibilidade ao estresse hídrico é acentuada durante os estágios de floração e enchimento de grãos, os quais são considerados críticos para a definição do rendimento (ANWAAR et al., 2020).

2.2 Estresses abióticos

Déficit hídrico

A produtividade e a qualidade dos grãos estão diretamente associadas às condições climáticas e aos genótipos cultivados, refletindo a complexa interação entre genótipo e ambiente (ST-MARSEILLE et al., 2019). Entre os fatores ambientais que afetam negativamente o desenvolvimento das culturas, destaca-se o déficit hídrico, cuja incidência tem se intensificado nos últimos anos em decorrência das mudanças climáticas globais (SCHAUBERGER et al., 2019; PEÑA-GALLARDO et al., 2019).

A seca representa uma das principais ameaças à produção agrícola, afetando cerca de 60% das áreas cultivadas sem irrigação e ocasionando perdas substanciais no rendimento das culturas (AHMED et al., 2019). Na região Centro-Oeste do Brasil, importante polo produtor de grãos, têm-se observado irregularidades na precipitação pluvial, principalmente em fases críticas do ciclo das culturas, como o florescimento, resultando em expressivas reduções na produtividade (CONAB, 2021; HATFIELD, 2016).

A sobrevivência vegetal sob estresse hídrico está condicionada à atuação simultânea de diversos mecanismos fisiológicos e bioquímicos. Três estratégias principais têm sido reconhecidas como adaptativas frente à escassez hídrica: (i) escape,

(ii) esquivar ou tolerância e (iii) resistência. No primeiro caso, as plantas antecipam seu ciclo de vida para evitar os períodos mais críticos de seca. Na estratégia de esquivar, ocorre a redução da demanda hídrica por meio do fechamento estomático e da diminuição da transpiração. Já a resistência envolve o fortalecimento de mecanismos celulares, como o acúmulo de antioxidantes e o ajuste osmótico nos tecidos vegetais (AHMED et al., 2020).

As adaptações ao estresse hídrico envolvem alterações morfofisiológicas (OUYANG et al., 2017), bioquímicas e metabólicas (MARČEK et al., 2019), destacando-se a redução da área foliar, reorganização dos pigmentos fotossintéticos, aprofundamento e expansão do sistema radicular, regulação da abertura estomática (HAWORTH et al., 2018), melhoria na eficiência do uso da água (EUA) e controle do crescimento vegetal (BLUM, 2016) e o aumento da atividade antioxidante (MISHRA et al., 2023; RAO et al., 2025).

Temperaturas elevadas

A temperatura atua como um dos principais moduladores do desenvolvimento vegetal, exercendo influência direta sobre a taxa de reações bioquímicas e a duração das fases fenológicas. Na cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.), o estresse térmico é definido pela exposição das plantas a temperaturas que excedem o limiar crítico para o seu desenvolvimento ideal, geralmente situado entre 15 °C e 25 °C (ASSENG et al., 2015). A ocorrência de temperaturas elevadas, especialmente quando associada a eventos de calor extremo, tem se tornado uma preocupação crescente para a triticultura mundial, dada a sua capacidade de comprometer severamente o rendimento e a qualidade industrial dos grãos (ULLAH et al., 2022).

Fisiologicamente, o estresse térmico desencadeia uma série de respostas adaptativas e deletérias. Em nível celular, as altas temperaturas promovem a desestabilização das membranas biológicas, aumentando sua fluidez e permeabilidade, o que resulta no extravasamento de eletrólitos e na perda da integridade compartimental (KALAJI et al., 2016). O aparato fotossintético é particularmente sensível; o calor excessivo inibe a atividade da enzima Rubisco e compromete a estabilidade do Fotossistema II (PSII), reduzindo a eficiência quântica e a taxa de fixação de CO₂ (SHARMA et al., 2020). Esse cenário é agravado pelo aumento da fotorrespiração e da respiração mitocondrial, o que reduz a disponibilidade líquida de fotoassimilados para o crescimento e enchimento de grãos (SICHER, 2015).

A sensibilidade do trigo ao calor varia conforme o estágio fenológico, sendo as fases reprodutivas as mais vulneráveis. Durante a microsporogênese e a antese, temperaturas superiores a 30 °C podem causar a esterilidade do pólen e a degeneração do saco embrionário, resultando em uma redução drástica no número de grãos por espiga (KHAN et al., 2021). No período de enchimento de grãos, o estresse térmico acelera a senescência foliar e encurta a duração da fase de deposição de amido, o que culmina na produção de grãos chochos e com menor massa individual (GUARIENTI et al., 2004). Estima-se que para cada aumento de 1 °C na temperatura média global acima do ideal, ocorra uma redução média de 6% na produtividade do trigo (ASSENG et al., 2015).

Para mitigar os danos oxidativos resultantes do estresse térmico, as plantas ativam mecanismos de defesa que incluem a síntese de proteínas de choque térmico (HSPs) e o incremento da atividade de enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase (SOD) e a catalase (CAT) (HASANUZZAMAN et al., 2013). Além disso, a manutenção da turgidez celular via ajuste osmótico e a regulação da condutância estomática são estratégias cruciais para a dissipação de calor por meio da transpiração, embora tais mecanismos possam ser limitados se houver déficit hídrico concomitante (MATSUNAGA et al., 2021).

Interação entre estresse hídrico e térmico

O aumento da temperatura ambiental intensifica a evaporação e reduz a disponibilidade de água no solo, dificultando a absorção hídrica pelas plantas. O fechamento estomático ocorre como resposta inicial ao estresse, reduzindo a fixação de CO₂ no ciclo de Calvin e comprometendo a fotossíntese (SIDDIQUI et al., 2015). Quando o estresse hídrico se associa ao estresse térmico, agravam-se os prejuízos na assimilação de CO₂ devido à diminuição de sua solubilidade, intensificando a fotorrespiração em virtude da maior fixação de O₂ (SICHER, 2015).

Além disso, sob temperaturas elevadas, aumenta-se a permeabilidade das membranas dos tilacóides, o que compromete a cadeia de transporte de elétrons, afeta a estabilidade dos complexos proteicos e prejudica o gradiente iônico necessário para a fotossíntese (KALAJI et al., 2016). Esse desbalanço energético resulta na formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO), que causam danos estruturais às membranas celulares por meio da peroxidação lipídica e da degradação proteica (NIU e XIANG, 2018).

Plantas mais tolerantes ao estresse ativam sistemas antioxidantes enzimáticos, como a superóxido dismutase, a catalase, a peroxidase do ascorbato e outras peroxidases, os quais desempenham papel fundamental na detoxificação das ERO (HASANUZZAMAN et al., 2013). Essas respostas fisiológicas e bioquímicas impactam diretamente atributos agrônômicos relevantes, especialmente no *T. aestivum* L., como o número de perfilhos e perfilhos férteis por planta, o número de grãos por espiga, a massa de mil grãos, a altura da planta, o comprimento do último entrenó (pedúnculo) e da espiga, a massa de grãos por espiga e a qualidade final dos grãos (BLUM, 2016).

A sensibilidade do trigo ao déficit hídrico e térmico é particularmente crítica nos estágios de pré-florescimento, florescimento e enchimento de grãos. Estudos conduzidos por Majid et al. (2007) demonstraram que a coincidência da seca com esses estágios pode reduzir em mais de 50% o número de grãos por planta e a produtividade total. De forma semelhante, Daryanto et al. (2016), ao analisarem dados de publicações entre 1980 e 2015, observaram uma redução média global de 21% no rendimento do trigo associada ao estresse hídrico. O estresse abiótico inibe o crescimento do trigo e afeta vários estágios de seu ciclo de vida, incluindo o crescimento vegetativo, o desenvolvimento reprodutivo e o enchimento de grãos (KHATIWADA et al., 2020), com consequente declínio no rendimento.

Os estresses ambientais, que ocorrem nas fases de pré-antese até a maturação, são determinantes para o rendimento e a qualidade final do trigo, sendo que o déficit hídrico e as temperaturas elevadas durante estes períodos críticos desencadeiam uma série de respostas fisiológicas que comprometem o desenvolvimento ideal dos grãos (ALI e AKMAL, 2022; KHAN et al., 2021; TYAGI & PANDEY, 2022). Sob esse panorama, torna-se evidente que a deficiência hídrica e o estresse térmico não apenas retardam o crescimento e o desenvolvimento vegetal, mas também comprometem severamente a produtividade das culturas (GERGANOVA et al., 2016). Além disso, a absorção de nutrientes sob condições de estresse mostra-se prejudicada, com reduções acentuadas especialmente quando o estresse se intensifica, afetando culturas como arroz (*Oryza sativa* L.), milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e trigo (*T. aestivum* L.) (HU et al., 2007; TANGUILIG et al., 1987).

2.3 Espécies Reativas de Oxigênio (ERO)

O advento do oxigênio molecular (O_2) na atmosfera terrestre, ocorrido há bilhões de anos, foi um marco evolutivo que permitiu o surgimento de organismos aeróbios, os quais passaram a utilizá-lo como aceptor final de elétrons no processo de respiração celular. Essa via metabólica, ao contrário dos processos fermentativos, promove uma produção energética substancialmente mais eficiente (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011). Contudo, embora essencial para o metabolismo celular, o oxigênio também origina, de maneira inevitável, espécies reativas de oxigênio (ERO), resultantes da atividade metabólica intensa em organelas como cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos (MITTLER et al., 2022).

Em resposta aos efeitos tóxicos associados às ERO, as plantas desenvolveram um sofisticado sistema antioxidante, composto por mecanismos enzimáticos e não enzimáticos. Entre as enzimas antioxidantes destacam-se a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT) e as peroxidases (POD); já entre os compostos antioxidantes não enzimáticos encontram-se o ascorbato (AsA), a glutathione (GSH), o β -caroteno e o α -tocoferol (RAJPUT et al., 2021; BARBOSA et al., 2014). Esses elementos atuam sinergicamente na prevenção da formação de radicais livres, na sua neutralização ou na decomposição, a fim de minimizar os danos oxidativos às estruturas celulares (MISHRA et al., 2023).

Situações de estresse, sejam de natureza biótica ou abiótica, comprometem a homeostase redox e intensificam a geração de ERO, desencadeando um quadro de estresse oxidativo (APEL e HIRT, 2004; ZANDALINAS e MITTLER, 2022). As ERO incluem tanto radicais livres, como o ânion superóxido ($O_2^{\bullet-}$), quanto formas não radicais, como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que podem ser originados a partir da excitação do O_2 (gerando oxigênio singlete – 1O_2) ou da adição sequencial de elétrons, formando espécies como $HO_2^{\bullet}$ e $OH^{\bullet}$ (D'AUTRÉAUX e TOLEDANO, 2007; BARBOSA et al., 2014).

O ânion superóxido ($O_2^{\bullet-}$), embora apresente reatividade moderada, é instável e tende a ser convertido em H_2O_2 e, posteriormente, em água, no processo denominado redução tetravalente do oxigênio. Quando protonado, gera o radical hidroperoxila ($HO_2^{\bullet}$), de maior potencial oxidativo (KARUPPANAPANDIAN et al., 2011; BARBOSA et al., 2014; ALAM et al., 2025). O radical hidroxila ($OH^{\bullet}$), por sua vez, é extremamente reativo e capaz de causar danos irreversíveis a proteínas, lipídios, carboidratos e ao DNA,

evidenciando seu papel na indução da peroxidação lipídica e de outras alterações biomoleculares (BARREIROS et al., 2006; BLOKHINA et al., 2003; ALAM et al., 2025).

As ERO são geradas de forma contínua em diversos processos metabólicos dependentes de oxigênio, como a respiração aeróbica, a fotossíntese e a fotorrespiração, distribuídas em distintos compartimentos celulares (BARBOSA et al., 2014; MITTLER et al., 2022). A produção de H_2O_2 nos peroxissomos, por exemplo, pode desempenhar função sinalizadora durante a fotossíntese (FOYER et al., 2009). Da mesma forma, a β -oxidação de ácidos graxos nos glioxissomos contribui para a formação de H_2O_2 .

A regulação desses efeitos deletérios envolve a ação coordenada de enzimas antioxidantes. A SOD catalisa a dismutação do $O_2^{\bullet-}$ em H_2O_2 e O_2 , sendo uma das primeiras linhas de defesa em organelas como cloroplastos, mitocôndrias, citosol e peroxissomos (MITTLER, 2002; BARBOSA et al., 2014; RAJPUT et al., 2021). A CAT, por sua vez, é essencial na conversão de H_2O_2 em água e oxigênio, especialmente sob condições de estresse elevado e durante a fotorrespiração (ANJUM et al., 2016; RAO et al., 2025).

As peroxidases (POD) apresentam diversas isoformas, cuja expressão pode ser constitutiva ou induzida por estressores ambientais. A atividade dessas enzimas está correlacionada à intensidade do estresse, utilizando H_2O_2 como oxidante e compostos fenólicos como doadores de elétrons (LOCATO, 2010; BARBOSA et al., 2014; RAJPUT et al., 2021). Em condições de alagamento, por exemplo, observa-se aumento na atividade da CAT, o que contribui para a manutenção da tolerância ao estresse oxidativo (MØLLER et al., 2007; HOSSAIN et al., 2009; MISHRA et al., 2023; RAO et al., 2025).

Alharbi et al. (2023) observaram elevação significativa nas atividades de SOD, POD e CAT em plantas de trigo submetidas ao estresse salino. Resultados semelhantes foram encontrados por Shemi et al. (2021), que verificaram aumento nas atividades de SOD, POD e CAT em plantas de trigo em condições adversas de disponibilidade hídrica.

2.4 A importância do zinco (Zn)

O zinco (Zn) é um micronutriente essencial ao metabolismo vegetal, exercendo funções vitais em diversos processos bioquímicos e fisiológicos. Sua importância se evidencia na ativação de inúmeras enzimas, como desidrogenases, isomerases, transfosforilases e RNA/DNA polimerases, sendo o único metal conhecido a participar

funcionalmente das seis classes enzimáticas (hidrolases, transferases, liases, ligases, isomerases e oxidoredutases), o que demonstra sua universalidade metabólica (REHMAN et al., 2018; LEE et al., 2020).

Além de sua função catalítica, o Zn contribui para processos como fotossíntese, metabolismo de carboidratos, síntese de proteínas, regulação do crescimento, desenvolvimento reprodutivo e resposta ao estresse (HAFEEZ et al., 2013; MARSCHNER, 2012; MA et al., 2017). Sua presença é fundamental na biossíntese do triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA), fitohormônio associado ao alongamento celular, ao crescimento longitudinal da planta e à formação dos internódios (MUNER et al., 2011; SANTOS et al., 2009, XU et al., 2023).

O Zn também é requerido na formação da clorofila e na manutenção da atividade da anidrase carbônica, enzima crucial na transferência de elétrons durante a fotossíntese. A deficiência desse nutriente pode comprometer a estrutura e a função dos cloroplastos, prejudicando a assimilação de carbono e o metabolismo energético da planta (TAIZ, 2017; BROADLEY, 2007; KIRKBY e RÖMHELD, 2007; SADEGHZADEH, 2013).

No nível molecular, o Zn exerce papel determinante na manutenção da estabilidade genética. Atua na organização da cromatina, na expressão gênica e na integridade do DNA/RNA, regulando a ação da RNA polimerase e a formação dos ribossomos. Assim, a deficiência de Zn pode acarretar distúrbios na síntese proteica, afetando diretamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal (CAKMAK et al., 1989; MARSCHNER, 2012).

Outro aspecto relevante da atuação do Zn está relacionado à defesa antioxidante das plantas. Esse micronutriente compõe a estrutura da enzima superóxido dismutase (Cu/Zn-SOD), responsável por converter o radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que por sua vez é transformado em água e oxigênio por meio da ação da peroxidase do ascorbato (APX) (ASADA, 1999; TAVANTI et al., 2021). Esses mecanismos antioxidantes são fundamentais para neutralizar espécies reativas de oxigênio (ERO), produzidas em situações de estresse abiótico e biótico, como ataque de patógenos ou herbivoria (YADAV et al., 2016; MITTLER, 2002).

A forma ativa da superóxido dismutase depende do metal associado, podendo ser Zn, Cu, Mn ou Fe, conforme sua localização celular (GILL e TUTEJA, 2010). A dismutação do ânion O_2^- reduz a formação de radicais hidroxila (OH^-), altamente tóxicos, protegendo os lipídeos de membranas e proteínas (WANG et al., 2018; HASANUZZAMAN et al., 2021). Níveis insuficientes de Zn aumentam o estresse

oxidativo, especialmente nas raízes, resultando na deterioração estrutural das membranas, extravasamento de compostos orgânicos (como carboidratos e aminoácidos) e maior suscetibilidade a doenças radiculares (SADEGHZADEH, 2013; CAKMAK, 2000).

Dessa forma, evidencia-se que o zinco é indispensável para a homeostase celular, o desenvolvimento vegetal e a resposta eficiente a condições adversas. Sua atuação multifacetada no metabolismo e na defesa antioxidante reforça a necessidade de uma nutrição equilibrada com esse micronutriente para garantir o crescimento saudável e o bom desempenho das plantas em diferentes condições ambientais (DUBEY e PATHAK, 2024; JAMALI, 2025).

As principais fontes de fertilizantes com zinco são: Sulfato de Zinco (ZnSO_4) é a fonte mais comum e amplamente utilizada, devido à sua alta solubilidade em água e custo-benefício; Óxido de Zinco (ZnO) que possui alto teor de zinco (50-80%), mas sua baixa solubilidade em água pode limitar a disponibilidade imediata para as plantas, sendo mais adequado para aplicações no solo com efeito residual; Quelatos de Zinco (Zn-EDTA , Zn-DTPA , Zn-EDDHA) são formas orgânicas onde o zinco é complexado por agentes quelantes, o que aumenta sua solubilidade e protege o nutriente de reações no solo que o tornariam indisponível. (MOUSAVI et al, 2013; RICO et al, 1996).

As formas de fornecimento de zinco para cultura podem ocorrer das seguintes maneiras, aplicação via solo, aplicação foliar e tratamento de semente (FAROOQ et al, 2012)

A aplicação foliar de zinco nos estádios de perfilhamento e enchimento de grãos tem se mostrado mais eficaz para o rendimento e componentes de grãos do que a aplicação no estágio de alongamento do colmo. A aplicação no estágio de espigamento também pode melhorar a produtividade e a biofortificação de zinco nos grãos (HUI et al., 2025; EBRAHIMI et al., 2021; DUBEY et al., 2025).

MATERIAL E MÉTODOS

Local, clima e solo

O experimento foi conduzido nas safras 2024 e 2025 sob coordenadas geográficas 54°49'W e 22°19'S e 452m de altitude, na Fazenda Experimental da COAMO, localizada no município de Dourados no estado do Mato Grosso do Sul. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS, 2018), com os seguintes atributos na camada de 0-20: pH (CaCl₂) = 5,79; P (mehlich-1) = 24,61 mg.dm⁻³; C = 16,26 g.dm⁻³, K, Ca, Mg e CTC = 0,64; 5,25; 2,49 e 12,21 cmolc.dm⁻³; respectivamente, V% = 68,63%, B, Cu, Fe, Mn, Zn e S-SO₄⁻² = 0,35; 23,53; 72,21; 129,49; 3,23 e 6,03 mg.dm⁻³ respectivamente.

O clima da região é classificado como tropical de altitude (Cwa), segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos com temperaturas amenas a baixas, apresentando duas estações bem definidas (FIETZ et al., 2017). As temperaturas mínimas, máximas, medias e precipitações pluviométricas por semana durante o período experimental, estão apresentados na Figura 1.

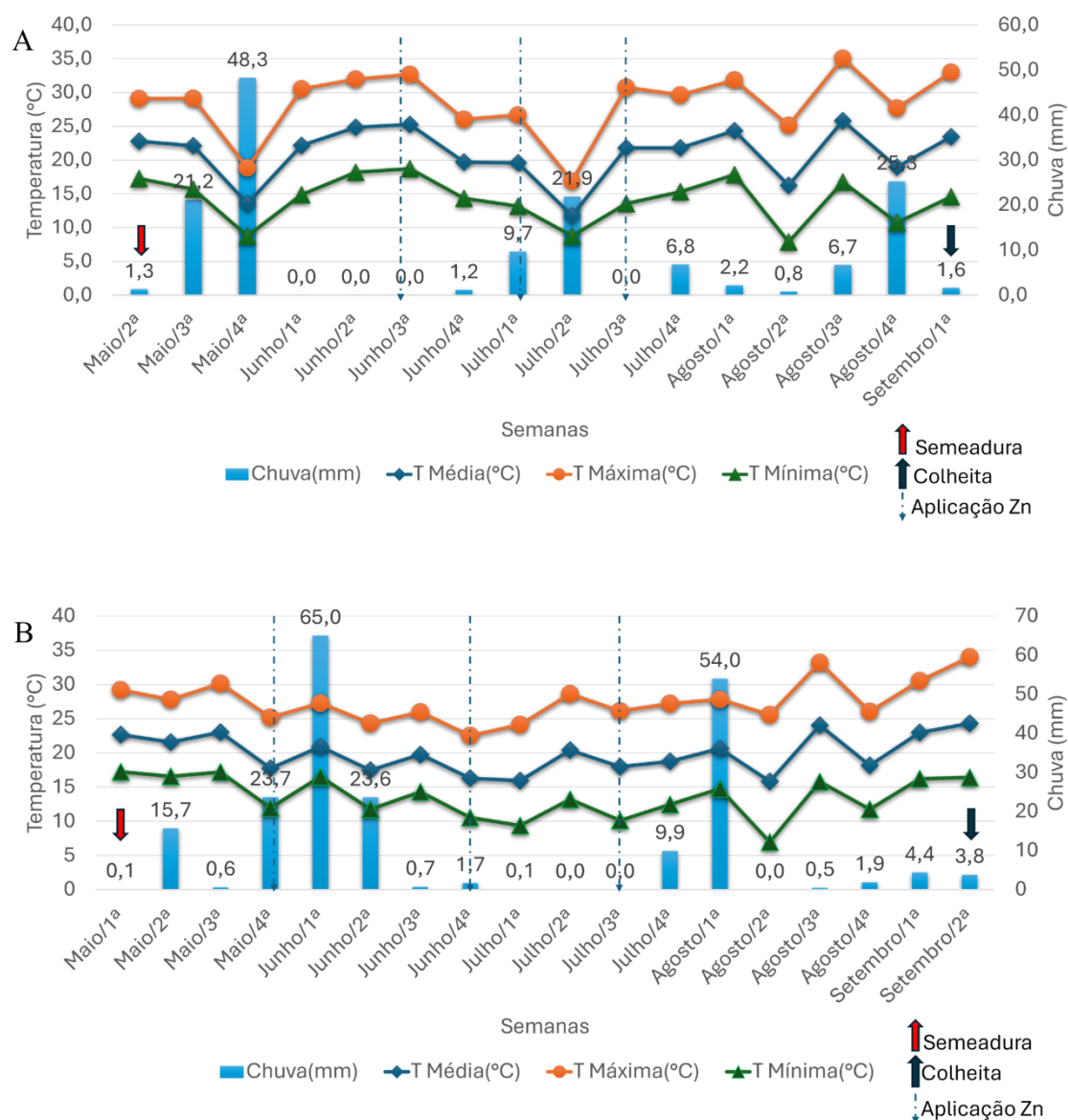


FIGURA 1. Dados de precipitação pluvial, temperatura máxima (T Máxima), temperatura mínima (T Mínima) e temperatura média (T Média) na área experimental para o ano de 2024 (A) e 2025 (B), por semana. Os dados foram coletados na estação pluviométrica da Embrapa (<https://clima.cpao.embrapa.br/>); em Dourados, Mato Grosso do Sul.

Delineamento experimental

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com 7 tratamentos - T1 = 100% da dose de zinco aplicado foliar estágio estágio 2 (3 a 4 folhas), T2 = 100% da dose de zinco no estágio 10 (emborrachamento), T3 = 100% dose de zinco no estágio 10.5.1 (antese, início do florescimento), T4 = 50% no estágio 2 (3 a 4 folhas) + 50% no estágio 10 (emborrachamento), T5 = 50% no estágio 2 (3 a 4 folhas) + 50% no estágio

10.5.1(antese, início do florescimento), T6 = 50% no estágio 10 (emborrachamento) + 50% no estágio 10.5.1(antese, início do florescimento) e controle (sem aplicação foliar de zinco), com 4 repetições, totalizando 28 unidades experimentais. As unidades experimentais foram constituídas de parcelas 3x6 metros, formando área total por parcela de 18 m², com área útil da parcela de 10 m² sendo descartada as 3 linhas laterais de cada lado da parcela e 0,5 m de cada extremidade das linhas restantes.

Cultivares

TBIO Calibre – trigo pão/melhorador de ciclo superprecoce (≤ 110 dias), porte baixo (65 cm) e peso de mil grãos médio de 36 g; moderadamente resistente à brusone, ferrugem da folha e queima da folha; resistência intermediária à mancha amarela, oídio, brusone da folha e estria bacteriana; moderadamente suscetível à giberela (BIOTRIGO GENÉTICA, 2023a).

TBIO Titan – trigo pão/melhorador de ciclo médio (111 – 120 dias), com estatura médio (80cm) e peso de mil grãos médio de 37 g; moderadamente resistente a resistente à ferrugem da folha, queima da folha, mancha amarela, oídio e brusone da espiga; resistência intermediária/moderadamente suscetível à giberela; destaca-se pela alta qualidade industrial, com forte estabilidade de glúten (BIOTRIGO GENÉTICA, 2023b).

Implantação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em duas safras 2024 e 2025. Na safra 2024 a semeadura na área foi realizada no dia 16/05/2024, utilizando o cultivar TBIO Calibre, com densidade de semeadura de 400 sementes.m⁻²(150kg.ha⁻¹), na safra 2025 a semeadura na área foi realizada no dia 02/05/2025, utilizando o cultivar TBIO Titan, com densidade de semeadura de 400 sementes.m⁻²(150kg.ha⁻¹), o espaçamento de semeadura foi 0,17m entre linhas.

O experimento foi instalado em área conduzida sob rotação de culturas, sendo a soja a cultura antecessora. Antes da semeadura do trigo (safra 2024 e 2025) a área foi dessecada, com a aplicação de 1,2 kg.ha⁻¹ de Glifosato, 1,0 L.ha⁻¹ de 2,4-D. Cerca de 7 dias após a aplicação do Glifosato e 2,4 D foi feita a aplicação sequencial de Glufosinato de amônio de 1,5 L.ha⁻¹. As sementes foram tratadas com Baytan FS 270ml/100kg de sementes e Gaúcho FS 70ml/100 kg de sementes, na safra 2024; e com com Spectro 250ml/100kg de sementes e Cruiser 350 FS 70ml/100 kg de sementes, na safra 2025.

A adubação foi realizada com base na análise de solo, conforme as recomendações de Kuhnem et al. (2020), na safra 2024 foi aplicado no sulco de semeadura 45 kg ha⁻¹ de N, 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 45 kg ha⁻¹ de K₂O, na safra 2025 foi aplicado no sulco de semeadura 62 kg ha⁻¹ de N, 25 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 25 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando como fontes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio. Na safra 2024 o controle pós-emergente de plantas daninhas de folhas largas foi realizado com Topik 150 ml.ha⁻¹, Ally 4 gr.ha⁻¹, Mees 250 ml.ha⁻¹, no início do perfilhamento da cultura do trigo (4 folhas). O manejo fitossanitário incluiu aplicações de fungicidas (Nativo 600 ml.ha⁻¹, Belyan 600 ml.ha⁻¹, Unizeb Gold 2 kg.ha⁻¹) no estágio de emborrachamento/elongação.

Em 2025 o controle pós-emergente de plantas daninhas de folhas largas foi realizado com Topik 150 ml.ha⁻¹, Fastac 150 ml.ha⁻¹, Mees 250 ml.ha⁻¹, e inseticidas (Zeus 260 ml.ha⁻¹, Expedition 70 ml.ha⁻¹, Feroce 750 ml.ha⁻¹) no início do perfilhamento da cultura do trigo (4 folhas). O manejo fitossanitário incluiu aplicações de herbicida, inseticida e fungicidas (U BR 48 800 ml.ha⁻¹, Sphere Max 200 ml.ha⁻¹, Connect 500 ml.ha⁻¹, Mees 300 ml.ha⁻¹) no estágio de emborrachamento/elongação.

As colheitas ocorreram em 04/09/2024 (Safra 2024) e 09/09/2025 (Safra 2025), de forma manual seguida de trilha mecanizada.

Foi utilizado como fonte de Zinco o produto Zintrac™, com teor Zn total de 40% p/p(693g Zn/l) e Nitrogênio (N) teor total de 1% p/p(17g N/l), sendo utilizado 144,30ml de produto comercial para a dose de 100g de Zn.ha⁻¹. O produto foi aplicado em três estádios vegetativos, seguindo a escala fenológica de Feeks-Large (1954), estágio 2 (3 a 4 folhas), estágio 10 (emborrachamento) e no estágio 10.5.1(antese, início do florescimento), conforme Tabela 1 e Figura 2. Os tratamentos utilizados e as datas de aplicação estão dispostos na Tabela 2.

TABELA 1. Estádios fenológicos da escala de Feeks, modificada por Large (1954).

Escala Feeks-Large	
Estádio	Afilhamento
1	Plantas recém-emergidas, com uma ou mais folhas.
2	Início do afilhamento
3	Afilhos formados. Folhas frequentemente enroladas em espiral. Em algumas variedades, as plantas podem ter hábito prostrado.
4	Início do aparecimento do pseudocaule. Bainhas foliares começam a alongar-se.
5	Pseudocaule (formado por bainhas foliares) fortemente desenvolvido.
Estádio	Alongamento do colmo
6	Primeiro nó do colmo visível na base da gema.
7	Segundo nó do colmo já formado.
8	Folha bandeira visível, mas ainda enrolada. Início do período de emborrachamento
9	Lígula da folha bandeira já visível.
10	Bainha da folha bandeira completamente desenvolvida. Espigas ainda não são visíveis.
Estádio	Espigamento
10.1	Primeiras espigas visíveis
10.2	Um quarto do processo de espigamento completo.
10.3	Metade do processo de espigamento completo.
10.4	Três quartos do processo de espigamento completo.
10.5	Todas as espigas fora da bainha.
Estádio	Florescimento
10.5.1	Início do florescimento.
10.5.2	Florescimento completo na parte apical da espiga.
10.5.3	Florescimento completo na parte basal da espiga.
10.5.4	Final de florescimento, grãos no estágio aquoso.
Estádio	Maturação
11	Grãos no estágio leitoso à maturação
11.1	Grãos no estágio leitoso.
11.2	Grãos no estágio de massa (macio e seco).
11.3	Grãos duros (difíceis de serem rompidos com a unha).
11.4	Maturação de colheita. Palhas secas.

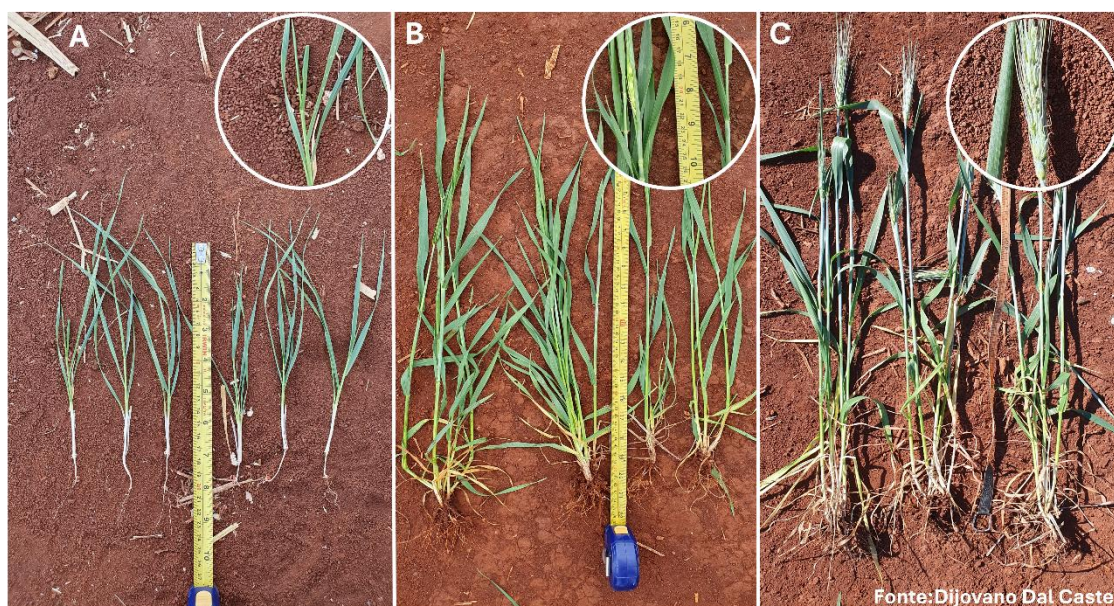


FIGURA 2. Estádios fenológicos do trigo, estádios de aplicação de zinco. A – Estádio 2 (3 a 4 folhas), B – Estádio 10 (Emborrachamento), C – estágio 10.5.1 (Antese)

TABELA 2. Estádios fenológicos da cultura do trigo e data de aplicação foliar de zinco em épocas isoladas ou combinadas.

Tratamento	E2 (3 a 4 folhas)	E10 (emborrachamento)	E10.5.1 (antese)
Controle	----	----	----
T1	100%	----	----
T2	----	100%	----
T3	----	----	100%
T4	50%	50%	----
T5	50%	----	50%
T6	----	50%	50%
Data aplicação	20/06/2024	03/07/2024	17/07/2024
	26/05/2025	26/06/2025	17/07/2025

A aplicação dos tratamentos foi realizada através de pulverizador pressurizado por CO₂, equipado com barra de quatro pontas modelo TT 11002, espaçadas de 0,50 m, posicionados a 0,5 m de altura em relação à superfície das plantas, volume de calda de 150L ha⁻¹ e pressão de trabalho de 250 kPa (Figura 3A).

Características analisadas

Características fitotécnicas analisadas:

- Altura de planta: Foi determinada com o auxílio de uma trena, medindo-se a distância entre a superfície do solo e o ápice da espiga, exceto as aristas no momento da colheita, em 10 plantas ao acaso na área útil da parcela (Figura 4A);
- Comprimento de espiga: Foi determinado como auxílio de uma trena, medindo-se a distância entre a base e o ápice da espiga, sem considerar as aristas, em 10 plantas ao acaso na área útil da parcela (Figura 4B);
- Número espiguetas por espiga: determinado em 10 espigas coletadas aleatoriamente na área útil da parcela;
- Número de grãos por espiguetas: determinado contando o número total de grãos em 10 espigas e dividindo pelo número de espiguetas por espiga;
- Número de grãos por espiga: determinado por meio da contagem dos grãos de 10 espigas e dividido por 10;
- Massa de mil grãos: determinada segundo metodologia das regras de análises de sementes propostas pelo Brasil - Ministério da Agricultura (Brasil, 2009);
- Produtividade de grãos: determinada pela coleta das plantas contidas em 10 m² dentro da parcela útil. Após a trilha mecânica, os grãos foram pesados e os dados transformados em kg.ha⁻¹ a 13% (base úmida) (Figura 4C e D);
- Peso hectolitro (PH): A medição foi realizada em uma balança de peso hectolitro, que pesa uma amostra padronizada de 1/4 de litro e projeta o valor para 100 litros. Mede a densidade dos grãos, expressa em quilos por cem litros (kg/hct) ou hectolitro (Figura 4E).

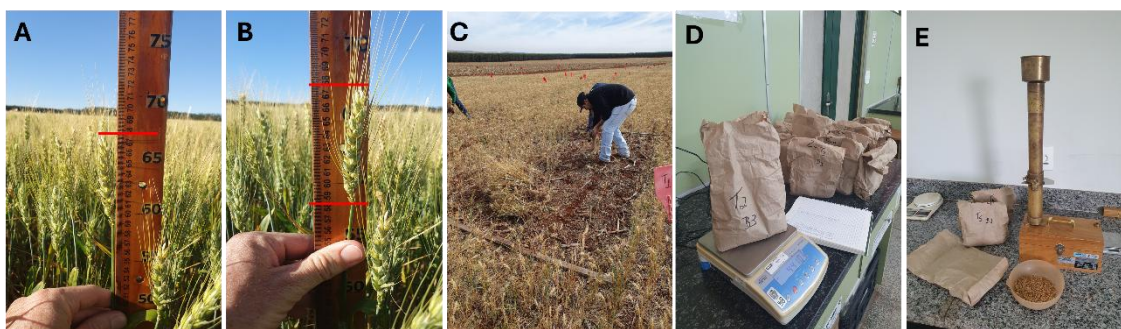


FIGURA 4. Medição altura de plantas (A), Medição tamanho de espiga (B), Colheita manual (C), Pesagem das amostras (D), Pesagem peso hectolitro PH (E), em plantas de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento.

Atividade enzimática:

Para análise da atividade das enzimas antioxidantes foram coletadas 50 folhas bandeiras por tratamento dez dias após a última aplicação de Zn na fase de antese. As folhas foram acondicionadas em papel alumínio, identificadas e imediatamente armazenadas em botijão contendo nitrogênio líquido (Figura 3B, C, D), e ao final da coleta levadas para o laboratório e armazenadas refrigeração até a realização da análise. Para o preparo do extrato e análise de atividade da superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POD), foi utilizada a metodologia descrita por Broetto (2014).



FIGURA 3. Aplicação de zinco (A), coleta de folhas para análise enzimática (B), botijão de nitrogênio líquido para armazenar amostras (C), amostras sob refrigeração (D), em plantas de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento.

Preparo do extrato: Amostras de um grama do material coletado e armazenado no freezer foram maceradas. De cada amostra foi pesado um grama para ser adicionado em uma solução contendo 0,3 g de polivinilpirrolidona (PVP) diluído em 100 mL de tampão fosfato de potássio (0,2 M) da qual foi adicionada apenas 6 mL. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 4000 rpm por 20 minutos a 4 °C e o sobrenadante foi utilizado como extrato enzimático.

Atividade da superóxido dismutase (SOD): Para realizar o ensaio da enzima superóxido dismutase, foi preparada uma solução contendo 2,0 mL de L-metionina (13 mM); 2,0 mL de azul de nitrotetrazólio (NBT) (0,44 mM); 2,0 mL de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) (100 nM); 3,2 mL tampão fosfato de potássio (0,1 M) e 0,8 mL de riboflavina (1 mM). Em um tubo de ensaio, foi adicionado 3 mL dessa solução para cada repetição e, em seguida, 100 µL de extrato enzimático. Os tubos foram levados para BOD (Biochemical Oxygen Demand) contendo lâmpadas fluorescentes de

15W, a 25°C e permaneceram por 15 minutos. Em seguida, os tubos foram retirados da fonte luminosa e a leitura da atividade da SOD foi realizada em espectrofotômetro Bioespectro a 560 nm com três repetições por tratamento. O resultado foi expresso em $\text{mg proteína.g mf}^{-1}$.

Atividade da peroxidase (POD): A atividade da enzima peroxidase foi determinada através da adição de 2 mL de tampão fosfato de potássio (0,2 M, pH 7,0) e 10 μL de extrato em tubo de ensaio. Os tubos foram levados para banho-maria até a estabilização da temperatura a 25°C. Em seguida, foi adicionado 200 μL de guaicol (0,5%) e 200 μL de peróxido de hidrogênio (0,08%) e, imediatamente, foi realizada a leitura na absorbância a 470 nm no espectrofotômetro Bioespectro, com três repetições por tratamento. O resultado foi expresso em $\text{mg proteína.g mf}^{-1}$.

Para determinação da concentração de proteínas totais foi utilizado o método de Bradford (1976). A partir de 0,300 g de matéria fresca, as proteínas foram extraídas em tampão fosfato. O extrato foi clarificado por centrifugação a 10.000 rpm por 10 minutos, e o sobrenadante foi utilizado para a análise. A reação foi iniciada pela adição de 500 μL do extrato a uma solução contendo 2,8 mL de água Milli-Q e 200 μL do reagente de Bradford. Após 5 minutos de repouso, a absorbância foi medida em espectrofotômetro Bioespectro a 595 nm, com três repetições por tratamento. Os resultados foram calculados e expressos em miligramas de proteína por grama de matéria fresca ($\text{mg proteína g}^{-1} \text{MF}$).

Análise Estatística

Os dados foram analisados por meio de Modelos Aditivos Generalizados para Localização, Escala e Forma (GAMLSS), permitindo maior flexibilidade na modelagem de variáveis resposta (BARBER, 2018). Para as variáveis contínuas positivas, foram consideradas distribuições como Normal (NO) e Gama (GA), enquanto variáveis percentuais foram modeladas por meio das distribuições Beta (BE), com funções de ligação log ou logit, conforme a natureza da resposta. O efeito de tratamento foi incluído como fator fixo, e o efeito de blocos como fator aleatório, utilizando a abordagem de efeitos mistos dentro da estrutura GAMLSS. A significância dos efeitos foi avaliada por meio de testes F obtidos pela análise de deviance, ao nível de 5% de significância. A adequação dos modelos foi verificada por análise gráfica dos resíduos e pelo teste de

normalidade de Shapiro–Wilk, além do cálculo do coeficiente de variação (CV) como medida de precisão experimental.

Quando identificadas diferenças significativas entre tratamentos, as comparações múltiplas de médias foram realizadas a partir das médias marginais estimadas, utilizando o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (R CORE TEAM, 2021). Os modelos GAMLSS foram ajustados por meio do pacote *gamlss* (RIGBY & STASINOPOULOS, 2005), enquanto as comparações de médias e obtenção das médias marginais estimadas foram realizadas com os pacotes *emmeans* (LENTH, 2023) e *multcomp* (HOTHORN et al., 2008). A manipulação, organização e estruturação dos dados foram conduzidas utilizando os pacotes *dplyr* e *tidyr*, pertencentes ao ecossistema *tidyverse* (WICKHAM, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os anos agrícolas de 2024 e 2025, nos quais foram conduzidos o experimento, apresentaram particularidades meteorológicas que exerceram influência direta sobre a fenologia do trigo e a eficácia da aplicação foliar de zinco.

Na safra de 2024, o ciclo de cultivo foi marcado por um regime de estresse abiótico, com uma precipitação pluviométrica total de apenas 147 mm, sendo 73,3% abaixo da necessidade da cultura (450-650 mm). Durante o estágio E2 (perfilhamento), em junho, a cultura enfrentou um veranico prolongado e intenso. Este déficit hídrico precoce comprometeu a formação dos componentes de rendimento desde as etapas iniciais, como o perfilhamento e a diferenciação da espiga. Posteriormente, nos estádios de E10 (emborrachamento) e E10.5.1 (antese), em julho, a cultura foi submetida a estresse térmico significativo, com picos de 34 °C e 12 dias acima de 30 °C. Tais condições extremas induziram a aceleração do ciclo fenológico e a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO), resultando em danos celulares e na redução da estatura das plantas.

Em contraste, a safra de 2025 apresentou condições de estresse abiótico mais amena, com volume total de precipitação de 205,7 mm (62,6% abaixo do ideal). A principal diferença na distribuição da pluviosidade ao longo das fases fenológicas da cultura. No período da aplicação em E2, no final de maio, observou-se uma oscilação térmica, com máximas de 32,8 °C seguidas por uma mínima de 10 °C, característica da transição sazonal, mas sem o prolongado déficit hídrico. As fases subsequentes de E10 (junho) e E10.5.1 (julho) transcorreram sob um regime de temperaturas mais próximas ao ótimo fisiológico para o trigo e com uma disponibilidade hídrica superior à verificada no ano anterior. Essa maior estabilidade ambiental contribuiu para um desenvolvimento mais robusto das plantas e uma menor diferença nas características fitotécnicas aos tratamentos com zinco, sugerindo que a pressão de estresse abiótico foi menos pronunciada em comparação com o cenário de 2024.

A eficácia da adubação foliar é intrinsecamente determinada pelas condições climáticas, notadamente temperatura e umidade relativa do ar, as quais governam a interação físico-química da calda com a cutícula e a translocação interna dos nutrientes.

Temperaturas elevadas e baixa umidade relativa induzem a rápida cristalização dos sais na superfície foliar, restringindo a absorção, ao passo que a umidade relativa elevada favorece a difusão iônica ao prolongar o estado líquido da solução. Adicionalmente, o estado fisiológico da planta, modulado por estes fatores abióticos, é crucial para a mobilidade pós-absorção. Condições ótimas maximizam o transporte via xilema e floema, enquanto estresses hídricos ou térmicos impõem severas restrições à redistribuição interna dos elementos (PRADO, 2008; FERNANDEZ et al., 2015, NIU et al, 2021).

A análise de deviance para safra 2024 indicou efeito significativo dos tratamentos em sete características: altura de plantas, comprimento de espiga, número de grãos por espiga, número de grãos por espiguetas, peso hectolitro (PH), peroxidase (POD) e superóxido dismutase (SOD) com valores de p inferiores a 0,05. Por outro lado, as características número de espiguetas por espiga, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos e proteína, não apresentaram efeitos significativos dos tratamentos avaliados (Tabela 3).

TABELA 3 - Resultados da análise de deviance (Estatística F e valor p) seguido do valor p do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (pSW) e do coeficiente de variação (CV%) para as características avaliadas em plantas de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento na Safra 2024.

Variável	Teste F		pSW	CV (%)
	F	Valor p		
Altura de plantas (cm)**	5,4453	0,0023	0,6324	4,20%
Comprimento de espiga (cm)**	2,9374	0,0353	0,4844	7,68%
Espiguetas por espiga (n°) ^{ns}	2,2116	0,0897	0,1033	11,21%
Grãos por espiga (n°)**	2,7993	0,042	0,1063	15,52%
Grãos por espiguetas (n°)**	3,6165	0,0157	0,0109	13,54%
Massa de 1000 grãos (g) ^{ns}	0,6799	0,6679	0,6114	3,43%
Produtividade (kg.ha ⁻¹) ^{ns}	0,6942	0,6575	0,1676	16,71%
PH (kg.hl ⁻¹)**	4,2748	0,0075	0,0487	0,40%
Proteína (mg proteína.g amostra ⁻¹) ^{ns}	1,2183	0,3422	0,6207	9,07%
POD (mg proteína.g mf ¹)**	28,7364	0,0001	0,0379	16,23%
SOD (mg proteína.g mf ¹)**	1,0553	0,0424	0,3156	9,28%

^{ns}, não significativo; **, significativo ao nível de 5% pelo teste F; S-W, valor p do teste de Normalidade Shapiro-Wilk; CV, coeficiente de variação; mf, massa fresca

Para safra 2025 a análise de deviance indicou efeito significativo dos tratamentos em duas características: Peroxidase (POD) e superóxido dismutase (SOD) com valores de p inferiores a 0,05. Para as características fitotécnicas não houve efeitos significativos, sugerindo que, para essas características, os tratamentos avaliados tiveram comportamento semelhante (Tabela 4).

TABELA 4 - Resultados da análise de deviance (Estatística F e valor p) seguido do valor p do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (pSW) e do coeficiente de variação (CV%) para as características avaliadas em plantas de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento na Safra 2025.

Variável	Teste F		pSW	CV (%)
	F	Valor p		
Altura de plantas (cm) ^{ns}	1,7926	0,1573	0,9882	2,09%
Comprimento de espiga (cm) ^{ns}	0,5222	0,7841	0,5586	6,53%
Espiguetas planta (n°) ^{ns}	2,0969	0,1044	0,7442	5,31%
Grãos por espiga (n°) ^{ns}	0,4038	0,8668	0,302	9,39%
Grãos por espiguetas (n°) ^{ns}	0,6247	0,7085	0,8518	8,12%
Massa de 1000 grãos (g) ^{ns}	0,9849	0,464	0,2579	3,19%
Produtividade (kg.ha ⁻¹) ^{ns}	1,6836	0,1824	0,3457	5,47%
PH (kg.hl ⁻¹) ^{ns}	1,9399	0,1289	0,0001	0,76%
Proteína (mg proteína.g amostra ⁻¹) ^{ns}	2,6189	0,0528	0,000	5,32%
POD (mg proteína.g mf ⁻¹)**	10,1923	0,0001	0,2023	7,46%
SOD (mg proteína.g mf ⁻¹)**	2,73	0,0458	0,0002	4,57%

^{ns}, não significativo; **, significativo ao nível de 5% pelo teste F; S-W, valor p do teste de Normalidade Shapiro-Wilk; CV, coeficiente de variação; mf, massa fresca

As aplicações foliares de zinco (Zn) exerceram influência significativa sobre a arquitetura e as características de produção da cultura do trigo, com destaque para os manejos parcelados. Na safra 2024, os tratamentos T4 (E2+E10) e T6 (E10+E10.5.1) proporcionaram plantas com estaturas superiores (45,78 cm e 46,20 cm, respectivamente) em comparação ao controle (40,53 cm), representando um incremento médio de 13,47% (Tabela 5). Em contrapartida, na safra 2025, não foram observadas diferenças estatísticas para a altura de plantas, embora a tendência de superioridade dos tratamentos parcelados tenha se mantido.

Em 2024, a cultura esteve sobre um estresse hídrico intenso durante a fase de alongamento do colmo, período em que a altura final é determinada. O déficit hídrico,

caracterizado pela baixa precipitação, reduziu a pressão de turgescência celular, limitando a expansão e a alongação dos internódios, processos fisiológicos cruciais para o crescimento (PORTER E GAWITH, 1999; BATOOL et al., 2023). Adicionalmente, houve temperaturas mais elevadas, com registros de máximas de 34 °C em julho de 2024, que aceleraram o desenvolvimento fenológico, encurtando o período de crescimento vegetativo e, conseqüentemente, a altura final da planta (HUSSAIN et al., 2018). Já em 2025, contou com uma distribuição pluvial mais regular e temperaturas mais amenas, o que resultou em plantas mais altas (média de 68 cm) e sem resposta significativa com Zn.

Nesse contexto, o fornecimento parcelado de Zn em fases de alta demanda metabólica, como de 3-4 folhas e no emborrachamento, favoreceu a biossíntese do triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA), um fitohormônio determinante para a manutenção da expansão celular e alongação dos internódios, proporcionando um maior alongamento do colmo (MOUSAVI et al., 2024; FLORES et al., 2023). A disponibilidade contínua do micronutriente permitiu que as plantas mantivessem taxas de crescimento mais estáveis, mesmo sob a pressão dos estresses abióticos típicos do Cerrado, mitigando os efeitos negativos observados no controle.

O comprimento da espiga e o número de grãos por espiga seguiram o padrão observado para a altura, com superioridade estatística dos tratamentos T4 (5,62 cm) e T6 (5,73 cm) na safra 2024 (Tabela 5), sendo 22,57% maior que o controle (4,63 cm), na safra 2025, entretanto, esta característica não apresentou diferença significativa. Estas características estão ligadas ao potencial de grãos que a espiga pode suportar, são definidos precocemente, entre o estágio de duplo anel (3-4 folhas/início perfilhamento) e a formação da espiguetta terminal (emborrachamento) (FIOREZE et al., 2019). O estresse hídrico e térmico durante a fase de crescimento da espiga (emborrachamento ou E10) induz a morte prematura de primórdios florais, reduzindo o número de sítios potenciais para a formação de grãos (BATOOL et al., 2023; FIOREZE et al., 2019). A aplicação de Zn em E10 associado a outro estágio fenológico atuou na proteção desses primórdios contra o estresse oxidativo, assegurando uma maior sobrevivência dos floretes férteis e, conseqüentemente, um maior comprimento de espiga e número de grãos.

Farhad et al. (2023) e Sakuma e Schnurbusch, (2020); relatam que a disponibilidade de Zn para cultura do trigo, quando assegurada na fase de diferenciação da espiga (duplo anel), demonstrou proteger primórdios florais da morte celular induzida pelo estresse.

TABELA 5. Altura de plantas, comprimento de espiga em plantas de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento nas safras 2024 e 2025.

Variável	Tratamento						
	Controle	T1	T2	T3	T4	T5	T6
2024							
Altura de plantas (cm)	40,53 c	44,24 ab	42,74 abc	41,68 bc	45,78 a	43,86 abc	46,20 a
Comprimento de espiga (cm)	4,63 b	5,24 ab	5,41 ab	5,28 ab	5,62 a	5,18 ab	5,73 a
2025							
Altura de plantas (cm)	65,88 a	66,15 a	67,58 a	67,51 a	68,48 a	68,28 a	68,03 a
Comprimento de espiga (cm)	6,90 a	7,00 a	6,95 a	7,00 a	7,20 a	7,05 a	7,38 a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si, pelo Teste de Tukey, ao nível de 5%. T1, E2 (3 a 4 folhas); T2, E10 (emborrachamento); T3, E10.5.1 (antese); T4, E2+E10 (3 a 4 folhas + emborrachamento); T5, E2+E10.5.1 (3 a 4 folhas + antese); T6, E10+E10.5.1 (emborrachamento + antese)

O número de grãos por espiga e grãos por espiguetas apresentaram diferenças significativas, com maiores valores nos manejos parcelados, com T4 (18,70 e 1,99) e T6 (18,13 e 1,79), demonstrando o benefício da aplicação parcelada em relação a aplicação única (Tabela 6). Em 2025 não houve diferença, mas observa-se que os maiores valores estão relacionados aos manejos parcelados 28,13 e 2,69 grãos.

O número de grãos por espiga e grãos por espiguetas são as características que mais impactam na produtividade final e são definidas no período que se estende desde a iniciação da espiguetas terminal até a antese (VESOHOSKI et al., 2011). Na safra 2024, os tratamentos T4 (18,70 e 1,99) e T6 (18,13 e 1,79), demonstraram o benefício da aplicação parcelada em relação a aplicação única (Tabela 6). Em 2025 não houve diferença, mas observa-se que os maiores valores estão relacionados aos manejos parcelados 28,13 e 2,69 grãos. É nesta janela fenológica (espigamento, a antese e o início do enchimento de grãos) que a planta define seu potencial máximo de grãos, tornando-se altamente sensível a fatores ambientais (JOLÁNKAI et al., 2018; KHAN et al., 2021).

O déficit hídrico e as altas temperaturas ocorridas em 2024, durante o crescimento da espiga e antese prejudicou a formação dos grãos (translocação de nutrientes), podendo ocasionar a morte de flores da espiga e esterilidade do pólen, além de encurtar o tempo disponível para o crescimento da espiga, resultando em um menor número de grãos (BA-TOOL et al., 2023; HUSSAIN et al., 2018; FISCHER, 1985).

Este resultado evidencia que a disponibilidade de Zn durante a pré-antese (emborrachamento) auxilia na viabilidade polínica e a fertilização efetiva, minimizando o aborto de flores causado pelo calor e pela seca (ULLAH et al., 2019; ERFATPOUR et al., 2024). Desta maneira o zinco atua na integridade da membrana celular e na síntese de proteínas exercendo um efeito protetor (TAIZ et al., 2017).

Para as características número de espiguetas por espiga, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos, tanto a safra 2024 quanto a safra 2025 não houve diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 3 e Tabela 4).

TABELA 6. Grãos por espiga, grãos por espiguetas, espiguetas por espiga, massa de 1000 grãos, produtividade de grãos e PH de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento nas safras 2024 e 2025.

Variável	Tratamento						
	Testemunha	T1	T2	T3	T4	T5	T6
2024							
Grãos por espiga (n°)	10,53 b	11,25 b	13,9 ab	13,13 ab	18,70 a	15,03 ab	18,13 a
Grãos por espiguetas (n°)	1,45 b	1,31 b	1,63 ab	1,58 ab	1,99 a	1,71 ab	1,79 a
Espiguetas por espiga (n°)	8,03 a	7,98 a	8,25 a	8,30 a	9,40 a	8,45 a	10,00 a
Massa de 1000 grãos (g)	36,10 a	35,88 a	36,43 a	35,90 a	37,37 a	36,51 a	36,66 a
Produtividade (kg.ha ⁻¹)	989,45 a	1033,80 a	1083,59 a	1152,30 a	1172,93 a	1111,38 a	1209,32 a
PH (kg.hl ⁻¹)	77,41 b	77,90 ab	77,85 ab	77,69 ab	78,15 a	77,40 b	78,20 a
2025							
Grãos por espiga (n°)	25,40 a	26,48 a	26,98 a	26,65 a	27,25 a	27,18 a	28,13 a
Grãos por espiguetas (n°)	2,49 a	2,50 a	2,66 a	2,54 a	2,67 a	2,66 a	2,69 a
Espiguetas por planta (n°)	10,07 a	10,22 a	10,18 a	10,60 a	11,30 a	10,60 a	10,65 a
Massa de 1000 grãos (g)	35,63 a	35,97 a	35,69 a	35,87 a	36,94 a	35,07 a	36,06 a
Produtividade (kg.ha ⁻¹)	3564,33 a	3572,69 a	3612,41 a	3729,48 a	3880,00 a	3813,10 a	3867,46 a
PH (kg.hl ⁻¹)	77,75 a	78,05 a	77,98 a	77,76 a	79,00 a	78,10 a	78,13 a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si, pelo Teste de Tukey, ao nível de 5%. T1, E2 (3 a 4 folhas); T2, E10 (emborrachamento); T3, E10.5.1 (antese); T4, E2+E10 (3 a 4 folhas + emborrachamento); T5, E2+E10.5.1 (3 a 4 folhas + antese); T6, E10+E10.5.1 (emborrachamento + antese)

Entretanto, a produtividade em 2024, variou entre 989,45 kg.ha⁻¹ (controle) e 1209,32 kg.ha⁻¹(T6). Observa-se, que os manejos parcelados demonstraram os maiores valores em relação ao tratamento controle, 1172,93 (T4) e 1209, 32 kg.ha⁻¹(T6), com média de 20,38% de incremento na produtividade (Tabela 6). Em 2025 (Tabela 6) é observado a mesma tendência com os manejos parcelados demonstrando as maiores produtividades, 3880,00 (T4) e 3867,46 kg.ha⁻¹(T6), com incremento produtivo médio de 8,68% em relação ao controle (3564,33 kg.ha⁻¹).

A ausência de significância estatística na produtividade, apesar dos efeitos positivos nas características produtivas (número de grãos por espiga, número de grãos por espiguetas e PH), sugere que o déficit hídrico intenso e as altas temperaturas atuaram como fator limitante primário, sobrepondo-se parcialmente aos benefícios nutricionais do zinco no rendimento final. Em 2025, embora a oferta hídrica ainda estivesse abaixo da necessidade da cultura (déficit hídrico moderado), as condições climáticas foram mais favoráveis em termos de distribuição pluviométrica e temperaturas, o que resultou em menor diferenciação estatística entre os tratamentos para as características morfofisiológicas e de rendimento.

O peso hectolitro (PH) também respondeu positivamente ao manejo parcelado de Zn na safra 2024, com destaque para o tratamento T6 e T4, que apresentaram os maiores valores (78,20 e 78,15 kg.hl⁻¹), indicando grãos mais densos e bem formados (Tabela 6). Mesmo não apresentando diferença significativa em 2025, observa-se que os tratamentos parcelados demonstraram os maiores valores de PH, 79,00 (T4) e 78,13 kg.hl⁻¹ (T6).

Sob condições adversas, déficit hídrico e altas temperaturas, ocorre a diminuição da taxa fotossintética e a limitação da translocação de fotoassimilados para o grão, comprometendo o enchimento do endosperma. A deposição incompleta de amido resulta em grãos menos densos, menores e com conformação irregular (ALI & AKMAL, 2022; KHAN et al., 2021; TYAGI & PANDEY, 2022).

A aplicação parcelada de zinco em T4 e T6 favoreceu o enchimento de grãos e o acúmulo de fotoassimilados no endosperma, mesmo sob estresse. Isso se deve à capacidade do Zn de sustentar a fotossíntese e a translocação de açúcares, o que resulta em grãos mais densos e de melhor qualidade (HAFEEZ et al., 2013; BROADLEY et al., 2007). Os resultados indicam que a disponibilidade contínua de zinco (Zn) se mostrou

essencial para a otimização do enchimento de grãos e a elevação da eficiência fisiológica da cultura.

A superioridade dos manejos parcelados sugere que o fornecimento de Zn permitiu suprir o nutriente em momentos fisiológicos distintos, sincronizando-o com os períodos de maior demanda metabólica — o alongamento do colmo e a diferenciação floral — fases críticas para o desenvolvimento do trigo (FISCHER, 1985; SLAFER e SAVIN, 1994; SLAFER et al, 1999; RODRIGUES et al., 2007). A manutenção de componentes reprodutivos mais elevados em plantas submetidas ao parcelamento de Zn sugere que o mesmo contribui para a sustentação da fotossíntese (MA et al., 2017) e transporte de fotoassimilados (MOUSAVI et al., 2024), sob condições de déficit hídrico e temperaturas elevadas.

Para a proteína, na safra 2024 e safra 2025, não houve diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 3 e Tabela 4). Porém observa-se um incremento no teor de proteína nos tratamentos parcelados em relação ao controle (Tabela 7).

A atividade da peroxidase (POD) na safra 2024, foi significativamente superior nos tratamentos com a aplicação parcelada de Zn, onde os tratamentos T4 (0,04 mg proteína.g mf⁻¹) e T6 (0,044 mg proteína.g mf⁻¹), demonstraram maior atividade antioxidante (Tabela 7). Nestes tratamentos a atividade da POD foi 250% maior que no Controle (0,012 mg proteína.g mf⁻¹). Na safra 2025 (Tabela 7) os tratamentos T4 (0,012 mg proteína.g mf⁻¹), T6 (0,012 mg proteína.g mf⁻¹) apresentaram a maior atividade do sistema antioxidante, sendo a atividade 33,33% maior em relação ao Controle (0,009 mg proteína.g mf⁻¹).

Embora o Zn não seja um cofator direto da POD, ele atua como gatilho que potencializa a resposta da POD, atuando na manutenção da integridade celular, como cofator enzimático e estabilizador estrutural de biomembranas. Este micronutriente protege os grupos sulfidríla de proteínas e os fosfolipídios contra a oxidação induzida por espécies reativas de oxigênio (ERO), resultando em menor peroxidação lipídica e maior estabilidade da membrana plasmática, potencializando a resposta adaptativa da planta (CAKMAK, 2000; AL JABRI et al., 2022; UMAIR HASSAN et al., 2024, NAZIR et al., 2024, D'ORIA et al., 2022).

TABELA 7. Teor de proteína e atividades de enzimas antioxidante em plantas de trigo com adubação foliar de zinco em diferentes estádios de desenvolvimento nas safras 2024 e 2025.

Variável	Tratamento						
	Controle	T1	T2	T3	T4	T5	T6
2024							
Proteína (mg proteína.g amostra ⁻¹)	27,62 a	29,33 a	30,96 a	29,94 a	31,64 a	31,40 a	32,28 a
POD (mg proteína.g mf ⁻¹)	0,012 c	0,015 bc	0,016 bc	0,021 bc	0,040 a	0,025 b	0,044 a
SOD (mg proteína.g mf ⁻¹)	50,64 b	50,99 b	50,98 b	51,04 b	57,96 a	54,58 a	55,29 a
2025							
Proteína (mg proteína.g amostra ⁻¹)	26,42 a	27,16 a	27,42 a	27,89 a	30,07 a	27,56 a	28,75 a
POD (mg proteína.g mf ⁻¹)	0,009 c	0,011 ab	0,009 c	0,011 ab	0,012 a	0,010 bc	0,012 a
SOD (mg proteína.g mf ⁻¹)	53,95 b	55,66 ab	58,43 ab	57,37 ab	58,92 ab	58,08 ab	60,60 a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si, pelo Teste de Tukey, ao nível de 5%. T1, E2 (3 a 4 folhas); T2, E10 (emborrachamento); T3, E10.5.1 (antese); T4, E2+E10 (3 a 4 folhas + emborrachamento); T5, E2+E10.5.1 (3 a 4 folhas + antese); T6, E10+E10.5.1 (emborrachamento + antese)

Este robusto sistema antioxidante permitiu que as plantas submetidas ao parcelamento mantivessem a homeostase redox, protegendo os lipídios de membrana e as proteínas contra a peroxidação, o que explica a manutenção de grãos mais densos (maior PH) mesmo sob condições adversas. A aplicação exógena de Zn tem sido associada à regulação positiva da expressão gênica de enzimas antioxidantes, incluindo a POD, o que reforça a capacidade da planta de se aclimatar a condições de estresse abiótico (TAVALLALI et al., 2010).

Para a atividade da Superóxido Dismutase (SOD), na safra 2024 os tratamentos parcelados apresentaram uma maior atividade, com 57,96 mg proteína.g mf⁻¹(T4), 55,29 mg proteína.g mf⁻¹ (T6) seguida por e 54,58 mg proteína.g mf⁻¹(T5), desta maneira observa-se um aumento de 10,47% da atividade da SOD em relação ao Controle (50,64 mg proteína.g mf⁻¹), demonstrando uma melhor resposta a aplicação parcelada de Zn (Tabela 7). Em 2025, a maior atividade da SOD, foi 60,602 mg proteína.g mf⁻¹ (T6) seguida por 58,92 mg proteína.g mf⁻¹(T4) e 58,08 mg proteína.g mf⁻¹(T5), todos observados nos tratamentos parcelados (Tabela 7), desta maneira observou-se o incremento médio de 9,73% na atividade da SOD em relação ao Controle (53,95 mg proteína.g mf⁻¹).

A SOD constitui a primeira linha de defesa, catalisando a dismutação do radical superóxido (O₂•⁻) em peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (MISHRA et al., 2023; SHEHZADI et al., 2024). O zinco é um componente estrutural essencial da isoforma Cu/Zn-SOD, predominante nos cloroplastos e citosol (MISHRA et al., 2023; DUBEY & PATHAK, 2024). O incremento na atividade da SOD (10,47% em 2024 e 9,73% em 2025) indica que o fornecimento parcelado garantiu a integridade funcional desta enzima nos momentos de maior estresse oxidativo, permitindo uma desintoxicação mais eficiente de espécies reativas de oxigênio (ERO) (SATTAR et al., 2022).

A suplementação com zinco (Zn) é fundamental para a integridade e a funcionalidade desta enzima que protege a planta contra o estresse oxidativo inicial (JAMALI, 2025; BROADLEY et al., 2007). Esse nutriente potencializa o sistema de defesa, eliminando espécies reativas de oxigênio e a manutenção da homeostase redox celular. Embora esse processo exija um investimento de energia metabólica para a estabilidade das membranas e processos enzimáticos, ele é fundamental para mitigar

danos oxidativos de limitações nutricionais, assegurando a integridade fisiológica da planta (SHEHZADI et al., 2024).

A elevação das atividades de POD e SOD nos manejos parcelados indica que a aplicação parcelada de Zn fortalece o sistema antioxidante, mitigando os danos oxidativos ocasionais por estresses abióticos (déficit hídrico e temperaturas elevadas). Demonstrando a influência da aplicação parcelada de Zn na ativação dos sistemas enzimáticos de defesa (TAIZ et al., 2017; ALI & AKMAL, 2022; CAKMAK, 2000), sendo essencial para a síntese de proteínas e integridade estrutural dos ribossomos (PECK et al., 2008).

Para condições de cultivo no Cerrado, onde geralmente a cultura passa por períodos de condições adversas (condições hídricas e térmicas desfavoráveis), a suplementação da cultura com Zn, de forma parcelada, se mostrou-se uma ferramenta estratégica e sustentável para mitigar o efeito do estresse abiótico. Isso ocorre porque o Zn assegura maior estabilidade bioquímica e adaptativa das plantas de trigo, conferindo uma resiliência induzida contra estresses abióticos (BROADLEY et al., 2007).

O fornecimento de Zn em momentos estratégicos de forma parcelada, nos tratamentos T4 (E2+E10) e T6 (E10+E10.5.1), favorece o equilíbrio hormonal e a expansão foliar, melhorando as condições fisiológicas das plantas, seu desempenho agrônômico e mitigando o efeito do estresse. Esses resultados asseguram a sincronização entre demanda metabólica e a disponibilidade do nutriente, reduzindo perdas e melhorando a nutrição ao longo do ciclo, auxiliando na proteção antioxidante e na estabilidade das membranas.

A aplicação de zinco representa, portanto, uma estratégia sustentável para a triticultura, ao garantir um aproveitamento mais eficiente do micronutriente pela cultura e contribuir para o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, auxiliando na mitigação do estresse oxidativo das plantas. Além disso, a adubação foliar constitui uma alternativa de menor impacto ambiental e menor custo quando comparada a estratégias mais intensivas, como o uso de sistemas irrigados, favorecendo maior eficiência no uso de recursos naturais. Considerando os efeitos benéficos observados, sugere-se a condução de novos estudos que testem doses adicionais de zinco, com o objetivo de maximizar a resposta da cultura, principalmente em relação à produtividade de grãos.

CONCLUSÃO

A aplicação foliar parcelada de zinco (100 g.ha^{-1}) nos estádios **E2+E10** e **E10+E10.5.1** promove o incremento da atividade enzimática antioxidante (peroxidase e superóxido dismutase) e a manutenção dos grãos por espiga, grãos por espiguetas, que contribuem para o rendimento do trigo sob estresse abiótico. A resposta da cultura à suplementação com zinco é influenciada pela intensidade do déficit hídrico e temperatura. O manejo parcelado de zinco constitui uma ferramenta técnica viável para mitigar estresses abióticos no ecótono Cerrado-Mata Atlântica, demandando validações complementares de doses e fontes para a consolidação de recomendações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, H. G. M. et al. Conferring drought-tolerant wheat genotypes through morpho-physiological and chlorophyll indices at seedling stage. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 27, n. 8, p. 2116-2123, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.06.019>.

AHMED, H. G. M. et al. Selection criteria for drought-tolerant bread wheat genotypes at seedling stage. **Sustainability**, v. 11, n. 9, p. 2584, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11092584>

AL JABRI, H. et al. Zinc oxide nanoparticles and their biosynthesis: overview. **Life**, v. 12, n. 4, p. 594, 2022. <https://doi.org/10.3390/life12040594>

ALAM, P. et al. Reactive oxygen species: balancing agents in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1713590, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1713590>.

ALHARBI, K. et al. Zinc oxide nanoparticles and PGPR strengthen salinity tolerance and productivity of wheat irrigated with saline water in sodic-saline soil. **Plant and Soil**, v. 493, n. 1, p. 475-495, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06245-7>

ALI, N.; AKMAL, M. Wheat Growth, Yield, and Quality Under Water Deficit and Reduced Nitrogen Supply: A Review. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 372, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020372>.

ANJUM, N. A. et al. Catalase and ascorbate peroxidase—representative H₂O₂- detoxifying heme enzymes in plants. **Environmental science and pollution research**, v. 23, n. 19, p. 19002-19029, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7309-6>

ANJUM, S. A. et al. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African journal of agricultural research**, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>

ANSARI, W. A. et al. Influence of drought stress on morphological, physiological and biochemical attributes of plants: A review. **Biosciences Biotechnology Research Asia**, v. 16, n. 4, p. 697-709, 2019. DOI: <https://doi.org/10.13005/bbra/2785>.

ANWAAR, H. A. et al. Assessment of grain yield indices in response to drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Saudi journal of biological sciences**, v. 27, n. 7, p. 1818-1823, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.009>.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 373–399, 2004. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>

ASADA, K.. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. **Annual Review of Plant Biology**, v. 50, n. 1, p. 601- 639, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.601>

ASSENG, S. et al. Rising temperatures reduce global wheat production. **Nature Climate Change**, v.5, p.143-147, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>

BANDURSKA, H. Drought stress responses: coping strategy and resistance. **Plants**, v. 11, n. 7, p. 922, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11070922>

BARBER, X. Flexible Regression and Smoothing: Using GAMLSS in R. **Journal of Statistical Software, Book Reviews**, [S. l.], v. 85, n. 2, p. 1–6, 2018. DOI: 10.18637/jss.v085.b02. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v085b02>. Acesso em: 22 jan. 2026.

BARBOSA, M. R. et al. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, p. 453-460, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300011>

BARREIROS, A. L. B. S.; DAVID, J. M.; DAVID, J. P. Oxidative stress: Relations between the formation of reactive species and the organism's defense. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 113–123, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000100021>

BATOOL, A. et al. Wheat water ecophysiology: a review on recent developments. **Global Journal of Botanical Science**, v. 11, p. 16-27, 2023. DOI: <https://doi.org/10.12974/2311-858X.2023.11.2>

BIOTRIGO GENÉTICA. **TBio Calibre**: qualidade e desempenho na produção de trigo. Passo Fundo, 2023a. Disponível em: <https://biotriga.com.br/cultivares/tbio-calibre/>. Acesso em: 18 dez. 2025.

BIOTRIGO GENÉTICA. **Biotrigo Titan**: qualidade e inovação no cultivo de trigo. Passo Fundo, 2023b. Disponível em: <https://biotriga.com.br/cultivares/biotrigo-titan/>. Acesso em: 18 dez. 2025.

BLOKHINA, O.; VIROLAINEN, E.; FAGERSTEDT, K. V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. **Annals of botany**, v. 91, n. 2, p. 179-194, 2003. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf118>

BLUM, A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, Cell and Environment**, v. 40, n. 1, p. 1-7, 2016. DOI: 10.1111/pce.12800.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: SNDA/DNPV/CLAV, 2009. 365 p.

BROADLEY, M. R. et al. Zinc of plants. **New phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677- 702, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>.

BROETTO, F. **Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas**. São Paulo: UNESP, 2014.

CAKMAK, I. Tansley Review No. 111 Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **The New Phytologist**, v. 146, n. 2, p. 185-205, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H.; BANGERTH, F. Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of indole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 40, n. 3, p. 405-412, 1989. <https://doi.org/10.1093/jxb/40.3.405>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2020/2021, n. 3 - Terceiro levantamento**. Brasília, DF: CONAB, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2024/25, 12º levantamento**. Brasília, DF: CONAB, set. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil)a. **Boletim da Safra de Grãos. Safra 2022/23, 12º levantamento**. Brasília, DF: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil)b. **Série Histórica das Safras. Trigo: área, produtividade e produção**. Brasília, DF: Conab, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>.

CONTI, V. et al. Drought stress affects the response of italian local tomato (*Solanum lycopersicum* L.) varieties in a genotype-dependent manner. **Plants**, v. 8, n. 9, p. 336, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8090336>.

D'AUTRÉAUX, B.; TOLEDANO, M. B. ROS as signalling molecules: Mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 8, n. 10, p. 813–824, 2007. <https://doi.org/10.1038/nrm2256>

D'ORIA, A. et al. Drought specifically downregulates mineral nutrition: Plant ionic content and associated gene expression. **Plant Direct**, v. 6, n. 8, p. e402, 2022. <https://doi.org/10.1002/pld3.402>

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P.. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. **PloS one**, v. 11, n. 5, p. e0156362, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0156362.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. **Rome**: FAO, 1979. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

Dourados. Prefeitura Municipal. (2019). Perfil da Cidade de Dourados. <http://www.dourados.ms.gov.br/index.php/cidade-de-dourados/>

DUBEY, D.; PATHAK, G. C. Zinc: A Critical Micronutrient for Growth and Development of Plants. **Journal of Applied Bioscience**, v. 50, n. 2, p. 95-102, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Divya-Dubey7/publication/387460782_Zinc_A_Critical_Micronutrient_for_Growth_and_Development_of_Plants/links/677cfbbf894c55208548334b/Zinc-A-Critical-Micronutrient-for-Growth-andDevelopment-of-Plants.pdf

DUBEY, V. et al. Comparative analysis of zinc sources and levels on growth and phenology of wheat (*Triticum aestivum* L.). **International Journal of Research in Agronomy**, v.8, n. 10, p.342-345, 2025. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i10e.3996>

DÖLGER, J. L.; HENNINGSEN, J. N.; MÜHLING, K. H. Antagonistic K/Mg ratios: is foliar application of MgSO₄ a superior alternative to root resupply?. **Plant and Soil**, v. 505, n. 1, p. 747-761, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06708-5>

EBRAHIMI, Z. et al. Effect of wheat Enrichment by Foliar Application of Zinc and Iron on Quantitive and Qualitative Traits at Differnt Phenological Stages. **Jornal of crop breeding**, v. 13, n. 38, p. 138-148, 2021

EMBRAPA. **Trigo**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/trigo>. Acesso em: 14 dez. 2024.

ERFATPOUR, M. et al. Ovule and seed development of crop plants in response to climate change. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 8, p. 1495610, 2024. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1495610>

FARHAD, Md et al. Heat stress in wheat: a global challenge to feed billions in the current era of the changing climate. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1203721, 2023. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1203721>

FAROOQ, M.; WAHID, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Micronutrient application through seed treatments: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 12, n. 1, p. 125-142, 2012.

FERNANDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. H. **Adubação foliar**: fundamentos científicos e técnicas de campo. São Paulo: Abisolo, 2015. 150 p.

FIETZ, C. R. et al. **O Clima da Região de Dourados, MS**. Documento 138. 3. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2017. 9-31p.

FIGLIARO, S. L. et al. Yield components in wheat as a function of temperature during spikelet differentiation stage. **Revista De Ciências Agroveterinárias**, 18(1), 24– 32, 2019. <https://doi.org/10.5965/223811711812019024>

FISCHER, R. A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. **Journal of Agricultural Science**, v. 105, p. 447–461, 1985. doi:10.1017/S0021859600056495

FLORES, R. A. et al. Can foliar application of zinc increased growth, physiology, and yield in snap beans? **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 18, p. 4519- 4531, 2023. <https://doi.org/10.1080/01904167.2023.2241485>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Crop Information - Wheat**. FAO Land & Water. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/wheat/en/>. Acesso em: 09 jan. 2026

FORNASIERI FILHO, Domingos. **Manual da cultura do trigo**. Jaboticabal, SP: Fundo de Cultura, 2008. 338 p. ISBN 978-85-7805-013-9.

FOYER, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. **Environmental and experimental botany**, v. 154, p. 134-142, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.003>

FOYER, C. H. et al. Photorespiratory metabolism: genes, mutants, energetics, and redox signaling. **Annual review of plant biology**, v. 60, p. 455-484, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.043008.091948>

GERGANOVA, M.; POPOVA, A. V.; STANOIEVA, D.; VELITCHKOVA, M. Tomato plants acclimate better to elevated temperature and high light than to treatment with each factor separately. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 104, p. 234-241, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.030>.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>

GOMES, D. P. et al. Progresso temporal do brusone do trigo em função do inóculo primário, da aplicação de fungicida e da resistência dos genótipos. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 1, p. 50-58, 2019. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/187354>.

GUARIENTI, Eliana Maria et al. Influência das temperaturas mínima e máxima em características de qualidade industrial e em rendimentos de grãos de trigo. **Food Science and Technology**, v. 24, p. 505-515, 2004

GUPTA, A.; RICO-MEDINA, A.; CAÑO-DELGADO, A. I. The physiology of plant responses to drought. **Science**, v. 368, n. 6488, p. 266-269, 17 abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>.

HAFAEEZ, B.; KHANIF, Y.; SALEEM, M. Role of Zinc in Plant Nutrition—A Review. **American Journal of Plant Sciences**, 2013.

HASANUZZAMAN, M. et al. Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 5, p. 9643-9684, 2013. DOI: 10.3390/ijms14059643.

HASANUZZAMAN, M. et al. Regulation of reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under salinity. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 17, p. 9326, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijms22179326>

HATFIELD, J. L. Increased Temperatures Have Dramatic Effects on Growth and Grain Yield of Three Maize Hybrids. **Agricultural e Environmental Letters**, 1, 1-5 [em linha]. 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/aerl2015.10.0006>.

HAWORTH, M. et al. The Impact of Heat Stress and Water Deficit on the Photosynthetic and Stomatal Physiology of Olive (*Olea europaea* L.) — A Case Study of the 2017 Heat Wave. **Plants**, v. 7, n. 4, p. 76, 2018. DOI: 10.3390/plants7040076.

HAY, R. K. M.; KIRBY, E. J. M. Convergence and synchrony-a review of the coordination of development in wheat. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 42, n. 5, p. 661-700, 1991. <https://doi.org/10.1071/AR9910661>

HE, M.; DIJKSTRA, F. A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. **New Phytologist**, v. 204, n. 4, p. 924-931, 2014. <https://doi.org/10.1111/nph.12952>

HOSSAIN, Z. et al. Modulation of the antioxidant system in citrus under waterlogging and subsequent drainage. **Journal of plant physiology**, v. 166, n. 13, p. 1391-1404, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.02.012>

HOTHORN, T.; BRETZ, F.; WESTFALL, P. Simultaneous inference in general parametric models. **Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences**, v. 50, n. 3, p. 346-363, 2008.

HU, Y. et al. Short-term effects of drought and salinity on mineral nutrient distribution along growing leaves of maize seedlings. **Environmental and Experimental Botany**, v. 60, n. 2, p. 268-275, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2006.11.003>.

HUI, Xiaoli et al. Zinc agronomic biofortification in wheat and its drivers: a global meta-analysis. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 3913, 2025.

HUSSAIN, S. et al. Effect of cold and heat stress on different stages of wheat: a review. **J. Glob. Innov. Agric. Soc. Sci**, v. 6, n. 4, p. 123-128, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012, 275p. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/bibliotecacatalogo?view=detalhes&id=26>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **Censo Agro 2017: Resultados Preliminares**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/resultados-censo-agro-2017/>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). (2019). Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos e regiões fitoecológicas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019, 176p. <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil). **PAM - Produção Agrícola Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>

ISHFAQ, M. et al. Foliar nutrition: Potential and challenges under multifaceted agriculture. **Environmental and Experimental Botany**, v. 200, p. 104909, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104909>

JAMALI, I. A. et al. Zinc-induced Plant Resilience Against Abiotic Stresses: Physiological, Biochemical and Molecular Insights—A Review. **Pakistan Journal of Agriculture**, v. 2, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.38211/PJA.2025.02.120>

JOLÁNKAI, M. et al. Impact of precipitation and temperature on the grain and protein yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. **Időjárás= Quarterly Journal Of The Hungarian Meteorological Service**, v. 122, n. 1, p. 31-40, 2018. DOI:10.28974/idojaras.2018.1.3

KALAJI, H. M. et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta physiologiae plantarum**, v. 38, n. 4, p. 102, 2016. DOI: 10.1007/s11738-016-2113-y.

KARUPPANAPANDIAN, T. et al. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian Journal of Crop Science**,

v. 5, n. 6, p. 709-725, 2011. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.282079847301776>

KHAN, A. et al. Rising atmospheric temperature impact on wheat and thermotolerance strategies. **Plants**, v. 10, n. 1, p. 43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10010043>.

KHATIWADA, A. et al. Effects of drought stress on yield and yield attributing characters of wheat: a review. **Agriways**, v. 8, n. 2, p. 118-124, 2020. DOI: 10.38112/agw.2020.v08i02.009

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Norcross: International Plant Nutrition Institute** 007, 2007. 24p. Encarte técnico, informações agronômicas, n. 18, 2007.

KOCH, G. et al. Leaf production and expansion: a generalized response to drought stresses from cells to whole leaf biomass—a case study in the tomato compound leaf. **Plants**, v. 8, n. 10, p. 409, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8100409>.

KUHNEM, P.; ROSA, A.C.; WAGNER, F.; ROSA, A.T.S. **Informações técnicas para trigo e triticale: Safra 2020**, Passo Fundo: Biotrigo Genética, 2020.

LARGE, E. C. Growth stages in cereals illustration of the Feeks scale. **Plant Pathology**, v. 3, n. 4, p. 128-129, 1954.

LEE, J. et al. Application of a glucose dehydrogenase-fused with zinc finger protein to label DNA aptamers for the electrochemical detection of VEGF. **Sensors**, v. 20, n. 14, p. 3878, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20143878>

LENTH, R. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means_. R package version 1.8. 5, 2023.

LIU, E. K. et al. Effects of water stress on photosynthetic characteristics, dry matter translocation and WUE in two winter wheat genotypes. **Agricultural Water Management**, v. 167, n. 3, p. 75-85, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.026>.

LOCATO, V. et al. Modulation of protein S-glutathionylation by ABA and H₂O₂ in *Arabidopsis thaliana* during stress responses. **Plant, Cell and Environment**, London, v. 33, p. 951–963, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02119>.

MA, D. et al. Physiological responses and yield of wheat plants in zinc-mediated alleviation of drought stress. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 860, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00860>

MAGHREBI, M. et al. The drought-induced plasticity of mineral nutrients contributes to drought tolerance discrimination in durum wheat. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 215, p. 109077, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109077>

MAJID, S. A.; ASGHAR, R.; MURTAZA, G. Yield stability analysis conferring adaptation of wheat to pre-and post-anthesis drought conditions. **Pakistan Journal of Botany**, v. 39, p. 1623- 1637, 2007.

MANFRON, P. A.; LAZZAROTTO, C.; MEDEIROS, S. L. P.. TRIGO-Aspectos agro-meteorológicos. **Ciência Rural**, v. 23, p. 233-239, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84781993000200021>.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. Chuvas no cerrado da região centro-oeste do Brasil: análise histórica e tendência futura. **Ateliê Geográfico**, v. 15, n. 1, p. 154-174, 2021.

MARČEK, T. et al. Metabolic response to drought in six winter wheat genotypes. **PLoS ONE**, v. 14, n. 2, p. 1-23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212411>.

MATOS, V. A. T.; ALECRIM, L. B. T.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; DUARTE, T. F.. Efeito da temperatura no desenvolvimento do trigo no Cerrado. **RECITA**, [S. l.], v. 1, p. e202501, 2025. Disponível em: <https://revistarecita.com.br/index.php/RECITA/article/view/1> . Acesso em: 11 fev. 2026.

MATSUNAGA, S. et al. Stage-specific characterization of physiological response to heat stress in the wheat cultivar Norin 61. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 13, p. 6942, 2021

MISHRA, N. et al. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1110622, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1110622>

MOUSAVI, S. R.; GALAVI, M.; REZAEI, M. Zinc (Zn) importance for crop production-a review. **International journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4 (1), p. 64-68, 2013.

NAZIR, M. A. et al. Zinc oxide nano-fertilizer differentially effect on morphological and physiological identity of redox-enzymes and biochemical attributes in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 13091, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63987-9>

NIU, Y.; XIANG, Y. An overview of biomembrane functions in plant responses to high-temperature stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 915, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00915>.

NIU, J. et al. Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 21, n. 1, p. 104-118, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00346-3>

OCHAGAVÍA, H. et al. Earliness per se by temperature interaction on wheat development. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 2584, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39201-6>

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic Forests in Southeastern Brazil and the influence of climate 1. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 793-810, 2000.

OUYANG, W. et al. Stomatal conductance, mesophyll conductance, and transpiration efficiency in relation to leaf anatomy in rice and wheat genotypes under drought. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 18, p. 5191-5205, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erx314>.

PANDEY, N.; PATHAK, G. C.; SHARMA, C. P.. Zinc is critically required for pollen function and fertilisation in lentil. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 20, n. 2, p. 89-96, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.09.006>

PECK, A. W.; MCDONALD, G. K.; GRAHAM, R. D. Zinc nutrition influences the protein composition of flour in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Cereal Science**, v. 47, n. 2, p. 266-274, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.04.006>

PEÑA-GALLARDO, M. et al. Response of crop yield to different time-scales of drought in the United States: Spatio-temporal patterns and climatic and environmental drivers. **Agricultural and forest meteorology**, v. 264, p. 40-55, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.019>.

PIMENTEL, A. J. B. et al. Caracterização de cultivares de trigo para tolerância ao calor e seus efeitos sobre alguns componentes da produção. **Revista Ceres**, v. 62, p. 191-198, 2015. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562020009>

PORTER, J. R.; GAWITH, M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. **European journal of agronomy**, v. 10, n. 1, p. 23-36, 1999. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(98\)00047-1](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(98)00047-1)

PRADO, R.M. **Nutrição de Plantas**. 1. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. v. 1.

R CORE TEAM et al. R: A language and environment for statistical computing. **R foundation for statistical computing**, Vienna, Austria, 2021.

RAJPUT, V. D. et al. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, p. 267, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biology10040267>.

RAO, M. J. et al. Antioxidant defense system in plants: Reactive oxygen species production, signaling, and scavenging during abiotic stress-induced oxidative damage. **Horticulturae**, v. 11, n. 5, p. 477, 2025. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050477>

REHMAN, A. et al. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. **Plant and Soil**, v. 422, n. 1-2, p. 283-315, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3507-3>

RICO, M. I.; ALVAREZ, J. M.; MINGOT, J. I. Efficiency of zinc ethylenediaminetetraacetate and zinc lignosulfonate soluble and coated fertilizers for maize in calcareous soil. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 44, n. 10, p. 3219-3223, 1996.

RIGBY, R. A.; STASINOPOULOS, D. M.. Generalized additive models for location, scale and shape. **Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics**, v. 54, n. 3, p. 507-554, 2005.

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M. C. C.; COSTENARO, E. R. Manejo de trigo para alta produtividade. **Revista Plantio Direto**, n. 123, p. 19-24, 2011.

RODRIGUES, O. et al. Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 817-825, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600008>

ROTH, L. et al. From neglecting to including cultivar-specific per se temperature responses: extending the concept of thermal time in field crops. **Plant Phenomics**, v. 6, p. 0185, 2024. DOI: 10.34133/plantphenomics.0185

SAATH, K. C. O.; FACHINELO, A. L. Crescimento da Demanda Mundial de Alimentos e Restrições do Fator Terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195-212, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 13, n. 4, p. 905-927, 2013. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>

SAKUMA, S.; SCHNURBUSCH, T. Of floral fortune: tinkering with the grain yield potential of cereal crops. **New Phytologist**, v. 225, n. 1, p. 127-141, 2020. <https://doi.org/10.1111/nph.16189>

SANGALLI, A. R. et al. Sistemas agroflorestais biodiversos: estilo ecológico de agricultura em assentamentos rurais em áreas de transição ecológica de Mata Atlântica e Cerrado do estado de Mato Grosso do Sul. **Desafio Online**, Campo Grande, v. 9, n. 3, p. 429-451, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.55028/don.v9i3.10214>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Ed. Revista e Ampliada Embrapa, Brasília. 2018.

SANTOS, H. C. et al. Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos: I. Crescimento vegetativo e produção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 125-130, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000200003>

SATTAR, A. et al. Foliar application of zinc improves morpho-physiological and antioxidant defense mechanisms, and agronomic grain biofortification of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 3, p. 1699-1706, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.10.061>

SCHAUBERGER, B. et al. Global historical soybean and wheat yield loss estimates from ozone pollution considering water and temperature as modifying effects. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 265, p. 1-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrfor-met.2018.11.004>.

SHAHID, S. et al. Water deficit stress tolerance potential of newly developed wheat genotypes for better yield based on agronomic traits and stress tolerance indices: Physio-biochemical responses, lipid peroxidation and antioxidative defense mechanism. **Plants**, v. 11, n. 3, p. 466, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11030466>

Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B. et al. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: A Review. **J Plant Growth Regulation**, n. 39, p. 509–531, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x>

SHEHZADI, N. et al. Zinc and nitrogen mediate the regulation of growth, leading to the upregulation of antioxidant aptitude, physio-biochemical traits, and yield in wheat plants. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 12897, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63423-y>

SHEMI, R. et al. Role of exogenous-applied salicylic acid, zinc and glycine betaine to improve drought-tolerance in wheat during reproductive growth stages. **BMC Plant Biology**, v. 21, n. 1, p. 574, 2021. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03367-x>

SICHER, R. C. Temperature shift experiments suggest that metabolic impairment and enhanced rates of photorespiration decrease organic acid levels in soybean leaflets exposed to supraoptimal growth temperatures. **Metabolites**, v. 5, n. 3, p. 443-454, 2015. DOI: 10.3390/metabo5030443.

SIDDIQUI, M. H. et al. Response of different genotypes of Faba Bean plant to drought stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 5, p. 10214- 10227, 2015. <https://doi.org/10.3390/ijms160510214>

SLAFER, G. A.; ARAUS, J. L.; RICHARDS, R. A. Promising traits for future breeding to increase wheat yield. In ‘**Wheat. Ecology and physiology of yield determination**’. (Eds EH Satorre, GA Slafer) pp. 379–415. 1999.

SLAFER, G. A.; SAVIN, R. Source—sink relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat. **Field Crops Research**, v. 37, n. 1, p. 39- 49, 1994. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90080-9)

SOUSA, C. et al. Crescimento e respostas enzimáticas do feijoeiro caupi sob estresse hídrico e nematoide de galhas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 113-118, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p113-118>

ST-MARSEILLE, A. G. et al. Simulating the impacts of climate change on soybean cyst nematode and the distribution of soybean. **Agricultural and forest meteorology**, v. 264, p. 178-187, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.008>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre-RS: Artmed, 2017. 888 p.

TANGUILIG, V. C. et al. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. **Plant and soil**, v. 103, n. 2, p. 155-168, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02370385>.

TAVALLALI, V. et al. Zinc alleviates salt stress and increases antioxidant enzyme activity in the leaves of pistachio (*Pistacia vera* L. ‘Badami’) seedlings. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 34, n. 4, p. 349-359, 2010. <https://doi.org/10.3906/tar-0905-10>

TAVANTI, T. R. et al. Micronutrient fertilization enhances ROS scavenging system for alleviation of abiotic stresses in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 160, p. 386-396, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>

TRACE – Traicing origins of food. **Molecular Biology Database**. Disponível em: http://www.bats.ch/trace/?file5=coreforms/taxonomy.php&record_number=21. Acesso em: 12 jan. 2024.

TYAGI, M.; PANDEY, G. C.. Physiology of heat and drought tolerance in wheat: An overview. **Journal of Cereal Research**, v. 14, n. 1, p. 13-25, 2022. <http://doi.org/10.25174/2582-2675/2022/122868>

ULLAH, A. et al. Adequate zinc nutrition improves the tolerance against drought and heat stresses in chickpea. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 143, p. 11-18, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.08.020>

ULLAH, A. et al. Heat stress effects on the reproductive physiology and yield of wheat. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 208, n. 1, p. 1-17, 2022

UMAIR HASSAN, M. et al. Zinc seed priming alleviates salinity stress and enhances sorghum growth by regulating antioxidant activities, nutrient homeostasis, and osmolyte

synthesis. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1815, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081815>

USDA. United States Department of Agriculture. National Agricultural Statistics Service. **Principal Crops Area Planted – States and United States: 2021-2023**. EUA, 2023. Disponível em: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usdaesmis/files/j098zb09z/hh63v8465/zg64w269x/acrg0623.pdf>.

USDA. United States Department of Agriculture. **Production – Wheat**. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0410000>. Acesso em: 29 set. 2025.

VESOHOSKI, F. et al. Componentes do rendimento de grãos em trigo e seus efeitos diretos e indiretos na produtividade. **Revista Ceres**, v. 58, p. 337-341, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000300014>

WANG, Y. et al. Superoxide dismutases: Dual roles in controlling ROS damage and regulating ROS signaling. **Journal of Cell Biology**, v. 217, n. 6, p. 1915-1928, 2018. <https://doi.org/10.1083/jcb.201708007>

WHITE, J. W. From genome to wheat: Emerging opportunities for modeling wheat growth and development. **European Journal of Agronomy**, v. 25, n. 2, p. 79-88, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.002>.

WICKHAM, H. Data analysis. In: ggplot2: elegant graphics for data analysis. **Cham: Springer international publishing**, 2016. p. 189-201.

XU, N. et al. Indole-3-acetic acid and zinc synergistically mitigate positively charged nanoplastic-induced damage in rice. **Journal of Hazardous Materials**, v. 455, p. 131637, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131637>

YADAV, N.; SHARMA, S. Reactive oxygen species, oxidative stress and ROS scavenging system in plants. **J. Chem. Pharm. Res**, v. 8, n. 5, p. 595-604, 2016.

ZANDALINAS, S. I.; MITTLER, R. Plant responses to multifactorial stress combination. **New Phytologist**, v. 234, n. 4, p. 1161-1167, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.18087>.

ZAVALA, C. B. R. et al. Análise fitogeográfica da flora arbustivo-arbórea em ecótono no Planalto da Bodoquena, MS, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 863-875, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509828640>.

ZÖRB, C.; LUDEWIG, U.; HAWKESFORD, M. J. Perspective on Wheat Yield and Quality with Reduced Nitrogen Supply. **Trends in Plant Science**, v. 23, n. 11, p. 1029- 1037, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.08.012>.