

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO CENTRO
DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

JACKSON RAMON MELONIO DOS SANTOS REIS

EFEITO DO TRATAMENTO DE SEMENTES DE GERGELIM COM MOLIBDÊNIO E
ZINCO SOBRE A GERMINAÇÃO, DESENVOLVIMENTO INICIAL DAS PLANTAS E
RESPOSTA AO DÉFICIT HÍDRICO

SÃO LUÍS - MA 2026

JACKSON RAMON MELONIO DOS SANTOS REIS

**EFEITO DO TRATAMENTO DE SEMENTES DE GERGELIM COM MOLIBDÊNIO E
ZINCO SOBRE A GERMINAÇÃO, DESENVOLVIMENTO INICIAL DAS PLANTAS E
RESPOSTA AO DÉFICIT HÍDRICO**

Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia do Centro de Ciências Agrárias
da Universidade Estadual do Maranhão,
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Josiane Isabela Da Silva
Rodrigues

SÃO LUÍS - MA 2026

JACKSON RAMON MELONIO DOS SANTOS REIS

**EFEITO DO TRATAMENTO DE SEMENTES DE GERGELIM COM MOLIBDÊNIO E
ZINCO SOBRE A GERMINAÇÃO, DESENVOLVIMENTO INICIAL DAS PLANTAS E
RESPOSTA AO DÉFICIT HÍDRICO**

Monografia apresentada ao Curso de
Agronomia do Centro de Ciências Agrárias
da Universidade Estadual do Maranhão,
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 02 / 07 / 2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JOSIANE ISABELA DA SILVA RODRIGUES**
Data: 15/07/2026 15:14:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Josiane Isabela Da Silva Rodrigues - Orientadora Departamento
de Fitotecnia e Fitossanidade - CCA/UEMA

Documento assinado digitalmente
 **JOSIANE MARLLE GUISCEN**
Data: 15/07/2026 17:30:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Josiane Marlle Guiscem
Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade - CCA/UEMA

Documento assinado digitalmente
 **FRANCISCO RONALDO BELEM FERNANDES**
Data: 15/07/2026 10:03:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Ronaldo Belém Fernandes
Departamento de Engenharia Agrícola - CCA/UEMA

Reis, Jackson Ramon Melonio dos Santos

Efeito do tratamento de sementes de gergelim com molibdênio e zinco sobre a germinação, desenvolvimento inicial das plantas e resposta ao déficit hídrico. / Jackson Ramon Melonio dos Santos Reis, João Henrique Zonta, Josiane Isabela da Silva Rodrigues. – São Luis MA, 2026.
49 f.

Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Estadual do Maranhão, 2026.

Orientador: Profa. Dra. Josiane Isabela da Silva Rodrigues

1.Micronutriente. 2.Enraizamento. 3.Qualidade fisiológica de sementes.
I.Zonta, João Henrique. II.Rodrigues, Josiane Isabela da Silva. III.Titulo.

CDU:631.53.027

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus, autor da vida, sem Ele eu não teria a capacidade para conclusão desta etapa. A minha tia Silma Santos Melônio Ribeiro, in memória, por todo amor, carinho e presença que marcaram a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre presente em minha vida, guiando meus passos e me dando forças nos momentos de dificuldades, permitindo que eu chegasse até esta etapa tão importante da minha caminhada. A minha mãe, Sildilene Melônio, agradeço por ser minha mentora, conselheira e uma das maiores inspirações da minha vida, sempre me apoiando, orientando e acreditando em mim. Ao meu pai, Jackson Waldik, e ao meu irmão, Jackson Ruan agradeço por todo amor, carinho e apoio ao longo dessa trajetória.

Tenho também gratidão às minhas tias, Sildileia, Silvana, Silma, in memória e Sirlene, por sempre se fazerem presentes em minha vida, sendo exemplos de força, cuidado e inspiração. Aos meus primos e primas, Itaney Neto, Itala Natália, Derliane Sousa, Carliana Sousa, Thalia Dandara, Athaleia Iyami, Ítalo Tauã e João Lucas, agradeço pela convivência, carinho e por fazerem parte da minha história. À minha avó, Athaleia Melônio, deixo minha gratidão por todo apoio, cuidado e incentivo, que sempre foram muito importantes para mim.

A minha namorada Hellen Santos Gomes, agradeço o carinho, apoio, companheirismo e incentivo durante essa caminhada. Estendo também minha gratidão à sua família, por todo acolhimento e consideração. Aos meus amigos e companheiros de graduação, Danilo Colins, Patrick Gabriel, Lucas Santos e Florivaldo Penha, pela parceria, amizade, apoio e por todos os momentos compartilhados ao longo dessa trajetória acadêmica.

Agradeço de forma especial à minha orientadora Prof^a Josiane Isabel da Silva Rodrigues, pela orientação, paciência, ensinamentos e contribuições durante a realização deste trabalho acadêmico. Pois suas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para minha formação acadêmica. Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica.

RESUMO

O gergelim é uma cultura de grande relevância, especialmente no Cerrado brasileiro, onde é cultivado majoritariamente em segunda safra. No entanto, essa época de cultivo expõe a planta a "veranicos", períodos de escassez hídrica que podem comprometer severamente a produtividade e a qualidade fisiológica das sementes. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito desse tratamento sobre o desenvolvimento inicial, focando especialmente no enraizamento e na capacidade de resposta à baixa disponibilidade de água. A metodologia consistiu na realização de pesquisa bibliográfica e dois ensaios experimentais utilizando a cultivar BRS Anahi. O primeiro, em laboratório, utilizou um esquema fatorial 4 x 4 (quatro doses de Zn e quatro de Mo: 0; 0,5; 1 e 1,5 g kg⁻¹ de sementes) em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Avaliou-se a qualidade fisiológica por meio de testes de germinação em papel e emergência em areia, determinando-se também comprimentos e massas secas da parte aérea e do sistema radicular. Com base na ANOVA e nos testes de médias, selecionaram-se as doses de 0,5 g kg⁻¹ de ambos os nutrientes para o segundo ensaio, conduzido em casa de vegetação. Este segundo ensaio adotou um esquema fatorial 4 x 2, comparando quatro tratamentos (T1: 0 Mo/0 Zn; T2: 0,5 g kg⁻¹ Mo/0 Zn; T3: 0 Mo/0,5 g kg⁻¹ Zn; T4: 0,5 g kg⁻¹ Mo/0,5 g kg⁻¹ Zn) sob dois regimes hídricos: irrigação plena e déficit hídrico aplicado durante sete dias a partir dos 20 dias após a emergência (DAE). Aos 35 DAE, foram avaliados altura, número de folhas e massas frescas e secas. Os resultados demonstraram que o tratamento de sementes afetou a germinação, mas não prejudicou a emergência das plântulas, mesmo nas dosagens máximas de 1,5 g kg⁻¹. Embora os micronutrientes não tenham aumentado a tolerância ao déficit hídrico de forma isolada per se, eles promoveram benefícios significativos no crescimento inicial e no desenvolvimento do sistema radicular em ambas as condições hídricas. O zinco, em particular, é reconhecido por seu papel na síntese de auxinas e na estabilidade de membranas sob estresse. Conclui-se que o tratamento de sementes com Zn e Mo é uma técnica promissora para acelerar o desenvolvimento inicial da cultura. Para o estabelecimento vigoroso em condições de casa de vegetação, os resultados mais eficazes foram obtidos com a dose de 0,5 g kg⁻¹ de Mo, aplicada isoladamente ou em combinação com 0,5 g kg⁻¹ de Zn, independentemente da disponibilidade de água.

Palavras-chave: Micronutriente. Enraizamento. Qualidade fisiológica de sementes.

ABSTRACT

Sesame is a crop of great relevance, especially in the Brazilian Cerrado, where it is mostly grown as a second crop. However, this growing season exposes the plant to "veranicos" (dry spells), periods of water scarcity that can severely compromise seed productivity and physiological quality. The objective of the study was to evaluate the effect of this treatment on initial development, focusing especially on rooting and the capacity to respond to low water availability. The methodology consisted of conducting bibliographic research and two experimental trials using the BRS Anahi cultivar. The first, in the laboratory, used a 4 x 4 factorial scheme (four doses of Zn and four of Mo: 0; 0.5; 1; and 1.5 g kg⁻¹ of seeds) in a completely randomized design with four replicates. Physiological quality was assessed through germination tests on paper and emergence in sand, also determining the lengths and dry masses of the shoots and the root system. Based on ANOVA and mean tests, doses of 0.5 g kg⁻¹ of both nutrients were selected for the second trial, conducted in a greenhouse. This second trial adopted a 4 x 2 factorial scheme, comparing four treatments (T1: 0 Mo/0 Zn; T2: 0.5 g kg⁻¹ Mo/0 Zn; T3: 0 Mo/0.5 g kg⁻¹ Zn; T4: 0.5 g kg⁻¹ Mo/0.5 g kg⁻¹ Zn) under two water regimes: full irrigation and water deficit applied for seven days starting at 20 days after emergence (DAE). At 35 DAE, height, leaf number, and fresh and dry masses were evaluated. The results demonstrated that seed treatment affected germination but did not impair seedling emergence, even at the maximum dosages of 1.5 g kg⁻¹. Although the micronutrients did not increase tolerance to water deficit in isolation *per se*, they promoted significant benefits in initial growth and root system development under both water conditions. Zinc, in particular, is recognized for its role in auxin synthesis and membrane stability under stress.

It is concluded that seed treatment with Zn and Mo is a promising technique to accelerate the crop's initial development. For vigorous establishment in greenhouse conditions, the most effective results were obtained with the dose of 0.5 g kg⁻¹ of Mo, applied alone or in combination with 0.5 g kg⁻¹ of Zn, regardless of water availability

Keywords: Micronutrient. Root development. Seed physiological quality.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de variância para dados de sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de zinco e molibdênio.....	37
Tabela 2 - Valores médios dos percentuais de germinação de sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, em teste realizado em papel aos seis dias após semeadura.....	38
Tabela 3 - Valores médios dos percentuais de emergência de sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, em teste realizado em areia aos seis dias após semeadura.....	38
Tabela 4 - Valores médios de massa seca da parte aérea e sistema radicular de plântulas provenientes do teste em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, aos seis dias após semeadura.....	39
Tabela 5 - Valores médios do comprimento da parte aérea e sistema radicular de plântulas provenientes do teste em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, aos seis dias após semeadura.....	39
Tabela 6 - Valores médios do comprimento da parte aérea de plântulas provenientes de teste de emergência em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de molibdênio e zinco, aos 6 dias.....	40
Tabela 7 - Valores médios do comprimento do sistema radicular de plântulas provenientes de teste de germinação em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de molibdênio e zinco, aos 6 dias	41
Tabela 8 - Valores médios do comprimento do sistema radicular de plântulas provenientes de teste de germinação em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de molibdênio e zinco, aos 6 dias	41
Tabela 9 - Valores médios da altura de plantas de gergelim da cultivar BRS Anahi, aos 35 DAE, tratadas com molibdênio e zinco, com irrigação total e com déficit hídrico de 7 dias (20 aos 27 DAE).....	42

Tabela 10 - Valores médios da massa fresca da parte aérea de plantas de gergelim da cultivar BRS Anahi, aos 35 DAE, tratadas com molibdênio e zinco, com irrigação total e com déficit hídrico de 7 dias (20 aos 27 DAE).....42

Tabela 11 - Valores médios da massa seca da parte aérea de plantas de gergelim da cultivar BRS Anahi, aos 35 DAE, tratadas com molibdênio e zinco, com irrigação total e com déficit hídrico de 7 dias (20 aos 27 DAE).....42

Tabela 12 - Valores médios da massa seca do sistema radicular de plantas de gergelim da cultivar BRS Anahi, aos 35 DAE, tratadas com molibdênio e zinco, com irrigação total e com déficit hídrico de 7 dias (20 aos 27 DAE).....43

Tabela 13 - Valores médios da altura de plantas, peso fresco e seco da parte aérea e peso seco do sistema radicular de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).....44

Tabela 14 - Valores médios da altura de plantas, peso fresco e seco da parte aérea e peso seco do sistema radicular de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE)45

LISTA DE SIGLAS

BRS - Sigla utilizada para identificação de cultivares da Embrapa. CRA

- Conteúdo relativo de água

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.

DAE - Dias após a emergência.

DFF - Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade.

ERO - Espécies reativas a oxigênio

MATOPIBA - Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Mo

- Molibdênio.

UEMA - Universidade Estadual do Maranhão. Zn

- Zinco.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Cultura do gergelim e importância agronômica	15
3.2 Déficit hídrico e desenvolvimento inicial das plantas	18
3.3 Funções do zinco na fisiologia vegetal	20
3.4 Funções do molibdênio na fisiologia vegetal	23
3.5 Qualidade fisiológica de sementes e vigor	25
3.6 Doses de micronutrientes e possível fitotoxidez	27
3.7 Tratamento de sementes com micronutrientes	29
3.8 Tratamento de sementes na cultura do gergelim	32
4 METODOLOGIA	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A área cultivada com gergelim vem crescendo nos últimos anos no Brasil, sobretudo em sistemas de segunda safra. Na safra de 2024/2025, consolidou-se como uma cultura estratégica para o agronegócio brasileiro, expandindo-se aceleradamente como alternativa de segunda safra, especialmente em sucessão à soja no Centro-Oeste. Segundo dados atualizados da CONAB (9º levantamento de junho de 2026), a área plantada na safra 2024/2025 atingiu 608 mil hectares, com uma produção de 399,4 mil toneladas e produtividade média de 657 kg ha⁻¹. As estimativas apontam um ajuste para 523,9 mil hectares e produção de 315,6 mil toneladas, reflexo da competição por área com o milho safrinha e do estresse hídrico observado em regiões produtoras.

Apesar dessa oscilação pontual, a trajetória de longo prazo é de crescimento robusto: entre 2024 e 2025, a área cultivada saltou 82%. Este fenômeno é justificado pelo baixo custo produtivo, aproximadamente um terço do investimento necessário para o milho aliado à rusticidade da planta e sua elevada tolerância ao déficit hídrico. Mato Grosso protagoniza o setor com mais de 60% da produção nacional, seguido por Pará e Tocantins. Segundo a CONAB (2025), a forte demanda internacional, impulsionada pela abertura do mercado chinês em 2025, sustenta a expansão, destinando cerca de 90% do volume colhido à exportação.

No contexto da safrinha, o cultivo do gergelim vem ganhando importância como alternativa quando o milho não pode ser implantado dentro da janela mais segura, sobretudo em propriedades onde a colheita da soja se prolonga e reduz o período útil para plantio. No Maranhão, conforme a CONAB (2025) inserido no MATOPIBA, essa dinâmica é particularmente relevante, já que a grande área de soja favorece a adoção de culturas em sucessão, mas a escolha da espécie depende diretamente do comportamento das chuvas e da segurança produtiva. O gergelim na segunda safra é plantado em um período mais sujeito a veranicos; portanto, o déficit hídrico pode afetar negativamente a germinação, o vigor das plântulas e o desenvolvimento inicial das plantas. Em espécies de ciclo curto, como o gergelim, limitações nas fases iniciais reduzem a uniformidade do estande e comprometem o aproveitamento do potencial produtivo. Diante da instabilidade climática observada em áreas de Cerrado e de

transição, tecnologias que favoreçam a emergência e o crescimento inicial tornam-se essenciais para reduzir riscos produtivos (Bahrami; Razmjoo; Jafari, 2012).

A qualidade fisiológica das sementes tem papel decisivo nesse cenário. Conforme Alves (2022, p.78), o potencial produtivo está estreitamente relacionado ao uso de sementes de qualidade, combinado com práticas de cultivo adequadas e condições favoráveis de solo e clima. No entanto, fatores abióticos como estresse hídrico podem limitar esse potencial, reduzindo germinação, emergência e crescimento inicial, problema que tende a se intensificar na segunda safra pela maior irregularidade pluviométrica. Para mitigar esse risco, o tratamento de sementes com micronutrientes surge como estratégia promissora. Freitas *et al.* (2020) e Tavares (2015) afirmam que nessa fase inicial, o sistema radicular da plântula é pouco exploratório e a disponibilidade imediata de nutrientes via semente pode favorecer processos fisiológicos essenciais ao estabelecimento, desde que sejam adotadas doses apropriadas e fontes compatíveis com a espécie.

Zinco e molibdênio destacam-se entre os micronutrientes estudados para tratamento de sementes. O zinco participa de diversas funções fisiológicas, incluindo atividade enzimática e síntese de reguladores de crescimento, influenciando o desenvolvimento inicial das plântulas. O molibdênio está relacionado ao metabolismo do nitrogênio, integrando enzimas fundamentais para o funcionamento vegetal.

Sobre a atuação desses micronutrientes, observa-se que:

Á eficiência desses elementos no tratamento depende de fatores como dose aplicada, espécie e as condições ambientais durante o desenvolvimento, exigindo maior cuidado em sementes pequenas, como as de gergelim. (Cakmak, 2005; Taiz *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2022).

Embora estudos apresentem resultados promissores sobre o uso de micronutrientes e a resposta do gergelim ao déficit hídrico, ainda existem lacunas quanto às doses ideais e aos efeitos sobre germinação, desenvolvimento radicular e tolerância ao estresse hídrico. Pesquisas indicam que a seca pode comprometer fortemente a germinação e crescimento inicial, reforçando a necessidade de estratégias que favoreçam o estabelecimento em condições adversas (Parsaie *et al.*,

2020; Kouighat, 2021). Assim, é necessário aprofundar o conhecimento sobre o tratamento de sementes de gergelim com Zn e Mo, avaliando seus efeitos na germinação, enraizamento e tolerância ao déficit hídrico. O presente trabalho propõe-se a investigar esses aspectos, detalhando objetivo, hipóteses, metodologia e organização do estudo, com vistas a fornecer subsídios para o manejo mais seguro e eficiente da cultura na safrinha.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito do tratamento de sementes de gergelim com zinco e molibdênio sobre a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas, com ênfase no enraizamento e na resposta ao déficit hídrico.

2.2 Objetivos específicos

- ✓ Avaliar o efeito de diferentes doses de Zn e Mo na germinação de sementes de gergelim.
- ✓ Avaliar o efeito do Zn e do Mo aplicados via tratamento de sementes no enraizamento e na tolerância ao estresse hídrico na cultura do gergelim.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cultura do gergelim e importância agronômica

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) consolidou-se como uma oleaginosa de alta relevância econômica e agronômica global, sendo valorizada tanto pelo elevado teor de óleo (42-55%) e proteínas quanto por sua versatilidade em diferentes ambientes (CONAB, 2023). No cenário agrícola brasileiro, a cultura encontrou um nicho estratégico nos sistemas de segunda safra (safrinha), particularmente no Cerrado, onde é utilizada em sucessão à soja devido ao seu ciclo curto e menor custo relativo de produção. Contudo, embora o gergelim apresente rusticidade, sua produtividade final está intrinsecamente ligada a um estabelecimento inicial bem-sucedido, pois

falhas na germinação e emergência reduzem o estande de plantas e limitam o desenvolvimento posterior.

A expansão do gergelim está associada a características como o ciclo curto, menor custo relativo de produção e possibilidade de inserção em sistemas agrícolas já consolidados. No entanto, mesmo sendo considerada uma cultura com certa rusticidade, o desempenho produtivo depende de adequado estabelecimento inicial, pois falhas de germinação e emergência podem reduzir o estande e comprometer o desenvolvimento posterior das plantas (Alves, 2022; CONAB, 2023).

Em áreas de segunda safra, a cultura fica mais exposta à irregularidade das chuvas e à ocorrência de veranicos, principalmente quando a semeadura acontece após o encerramento da janela ideal. Essa condição torna o planejamento do manejo inicial ainda mais importante, pois as plântulas podem enfrentar restrição hídrica justamente em uma fase sensível do ciclo, quando o sistema radicular ainda está em formação (Bahrami; Razmjoo; Jafari, 2012).

Apesar da rusticidade da cultura, o sucesso da lavoura de gergelim depende da uniformidade na germinação e na emergência. Segundo Langham (2008), a obtenção de um estande uniforme é um dos principais fatores para o sucesso produtivo do gergelim, sendo a germinação e a emergência adequadas essenciais para o estabelecimento da cultura. Nas áreas de segunda safra, a cultura enfrenta o desafio da irregularidade das chuvas e a ocorrência de veranicos, especialmente quando a semeadura ocorre fora da janela ideal. Esse estresse hídrico é severo quando atinge as plântulas em fase inicial, período em que o sistema radicular ainda está em formação e a planta possui menor capacidade de recuperação.

Fisiologicamente, o déficit hídrico afeta processos como a absorção de nutrientes, a expansão celular e a fotossíntese. Sob estresse, as plantas fecham seus estômatos para evitar a perda de água, o que reduz a condutância estomática e a taxa de assimilação de CO_2 . Conforme Dehnavi *et al.* (2017):

O déficit hídrico limita significativamente a absorção de nutrientes pelas raízes devido à redução da umidade do solo e à perda de flexibilidade das membranas celulares, o que compromete o transporte mineral para a parte aérea e afeta negativamente a expansão celular e o acúmulo de matéria seca (Dehnavi *et al.*, 2017, p. 27).

Esse cenário resulta em uma redução no conteúdo relativo de água (CRA) das folhas e no acúmulo de matéria seca. A resposta do gergelim à seca envolve ajustes fisiológicos, bioquímicos e moleculares complexos. O estresse induz a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), que podem causar danos oxidativos às membranas celulares, medidos frequentemente pelo teor de malondialdeído (MDA) e pela taxa de extravasamento de eletrólitos.

Conforme Baghery (2023), genótipos tolerantes à seca, como as cultivares desenvolvidas pela Embrapa, exibem estratégias adaptativas superiores, incluindo um sistema radicular mais extenso e profundo. Bioquimicamente, essas plantas acumulam solutos compatíveis (osmoprotetores), como açúcares solúveis e, notadamente, a prolina, que auxilia no ajuste osmótico e estabiliza estruturas celulares. Além disso, ativam sistemas de defesa enzimática como superóxido dismutase, catalase e peroxidase, para neutralizar as ERO. No nível molecular, a tolerância está associada à maior expressão de genes de defesa, como $MnSOD_1$ e $MnSOD_2$.

Nessa perspectiva, a qualidade das sementes e manejo de suplementação é a base de um estande vigoroso. A qualidade das sementes, abrangendo atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários. Sementes de baixo vigor geram plantas débeis, enquanto sementes infectadas podem introduzir patógenos devastadores, como a podridão-negra-do-caule (*Macrophomina phaseolina*) e a murcha-de-fusarium, que comprometem a lavoura desde o início. Para mitigar os efeitos do déficit hídrico inicial, tecnologias como o condicionamento fisiológico (*seed priming*) e o nutri-priming têm ganhado destaque.

O priming consiste na hidratação controlada das sementes para iniciar processos metabólicos pré-germinativos sem a protrusão da radícula, resultando em germinação mais rápida e uniforme. O tratamento de sementes com micronutrientes como zinco (Zn), boro (B) e molibdênio (Mo) apresenta resultados promissores (REIS *et al.*, 2024). O zinco é vital para a ativação enzimática, integridade de membranas e proteção contra o estresse oxidativo. O boro é essencial para o crescimento celular e o alongamento radicular, prevenindo anomalias como a podridão-parda.

Pesquisas indicam que o tratamento de sementes com doses equilibradas de molibdênio e zinco pode acelerar o desenvolvimento inicial e fortalecer o sistema radicular, mesmo sob restrição hídrica. Embora doses elevadas de micronutrientes possam prejudicar a germinação em laboratório, aplicações criteriosas via semente ou foliar aumentam a tolerância ao estresse e o vigor das plântulas. Em suma, a expansão sustentável do gergelim no Brasil exige a integração de genótipos resilientes, sementes de alta qualidade e técnicas de manejo que garantam que as plântulas superem os estresses ambientais críticos das fases iniciais

3.2 Déficit hídrico e desenvolvimento inicial das plantas

O déficit hídrico é reconhecido como um dos principais fatores abióticos que limitam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas agrícolas em diversas regiões do mundo. A escassez de água no solo interfere diretamente em processos fisiológicos essenciais para a manutenção do metabolismo vegetal, afetando a absorção de nutrientes, a expansão celular, a fotossíntese, o transporte de fotoassimilados e o acúmulo de matéria seca. Como consequência, as plantas submetidas ao estresse hídrico apresentam redução no crescimento vegetativo, menor eficiência metabólica e diminuição do potencial produtivo. A intensidade dos danos depende da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento em que ocorre a deficiência de água. Conforme Souza (2021), o déficit hídrico nas fases iniciais do ciclo da cultura, tem efeitos ainda mais prejudiciais, comprometendo o estabelecimento das plântulas e reduzindo a capacidade de recuperação das plantas.

Na cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.), a disponibilidade de água durante os estágios iniciais é fundamental para garantir uma germinação adequada e o estabelecimento uniforme da lavoura. Embora a espécie seja frequentemente considerada tolerante às condições de seca quando comparada a outras oleaginosas, essa tolerância não é uniforme ao longo de todo o ciclo da planta. As fases de germinação e emergência representam períodos críticos, nos quais a deficiência hídrica pode provocar reduções significativas na porcentagem de germinação, no vigor das sementes e no crescimento inicial das plântulas. Nessas condições, a absorção de água pelas sementes é limitada, dificultando a ativação dos processos metabólicos

responsáveis pelo início do desenvolvimento embrionário e pela emergência das plântulas.

Bahrami, Razmjoo e Jafari (2012) apontam que o estresse hídrico afeta negativamente tanto a germinação quanto o crescimento inicial de diferentes cultivares de gergelim. Os autores observaram reduções significativas na taxa de germinação, no comprimento das raízes e da parte aérea, além de diminuição do vigor das plântulas submetidas à restrição hídrica. Esses resultados evidenciam que a fase inicial de desenvolvimento é determinante para a formação de plantas mais vigorosas e produtivas. Um estande inadequado ou desuniforme pode comprometer o desenvolvimento posterior da cultura, reduzindo a capacidade competitiva das plantas e influenciando negativamente a produtividade final.

Além da germinação e da emergência, o sistema radicular desempenha papel essencial na adaptação das plantas às condições de déficit hídrico. As raízes são responsáveis pela exploração do perfil do solo e pela absorção de água e nutrientes, constituindo o principal mecanismo de sobrevivência em ambientes com disponibilidade hídrica limitada. Em situações de seca, plantas que apresentam sistemas radiculares mais profundos ou mais eficientes na exploração do solo possuem maiores chances de manter o crescimento e a atividade fisiológica. Dessa forma, características relacionadas ao desenvolvimento radicular são frequentemente associadas à tolerância ao estresse hídrico.

De acordo com Dossa *et al.* (2017), a tolerância do gergelim à seca envolve um conjunto complexo de mecanismos fisiológicos, bioquímicos e anatômicos. Entre essas respostas adaptativas destacam-se o ajuste osmótico, a manutenção do potencial hídrico celular, a regulação da abertura estomática, o aumento da eficiência no uso da água e a ativação de sistemas antioxidantes capazes de minimizar os danos causados pelo estresse oxidativo. Os autores ressaltam que a resposta do gergelim à deficiência hídrica não depende de um único mecanismo, mas da interação entre diversos processos que atuam conjuntamente para aumentar a sobrevivência e a adaptação das plantas em ambientes adversos.

Outro aspecto importante relacionado à tolerância ao déficit hídrico é a variabilidade genética existente entre os diferentes materiais de gergelim. Estudos

conduzidos por Kouighat *et al.* (2021), afirmam que genótipos submetidos à seca simulada, evidenciaram diferenças significativas na capacidade de germinação e no crescimento inicial das plântulas sob condições de restrição hídrica. Alguns genótipos apresentaram maior capacidade de manter o desenvolvimento mesmo em condições de baixa disponibilidade de água, enquanto outros mostraram elevada sensibilidade ao estresse. Esses resultados demonstram o potencial da seleção genética como ferramenta para o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas às condições de seca.

Diante desse cenário, torna-se evidente que o déficit hídrico representa um dos principais desafios para a produção de gergelim, especialmente durante os estágios iniciais do ciclo da cultura. A compreensão dos mecanismos envolvidos na tolerância à seca, associada ao uso de genótipos mais resistentes e à adoção de práticas de manejo adequadas, pode contribuir significativamente para reduzir os efeitos da deficiência hídrica sobre a germinação, o crescimento inicial e o desempenho produtivo das plantas. Dessa forma, o desenvolvimento de estratégias voltadas ao aumento da tolerância ao estresse hídrico constitui uma importante alternativa para garantir maior estabilidade e sustentabilidade da produção de gergelim em regiões sujeitas à irregularidade das chuvas e à escassez de água.

3.3 Funções do zinco na fisiologia vegetal

O zinco (Zn) é um dos micronutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, desempenhando funções fundamentais em diversos processos fisiológicos, bioquímicos e metabólicos. Embora seja requerido em pequenas quantidades quando comparado aos macronutrientes, sua presença é indispensável para a manutenção do metabolismo vegetal e para a expressão adequada do potencial produtivo das culturas agrícolas. Veloso (2007) afirma que:

A deficiência desse elemento pode comprometer significativamente o crescimento das plantas, especialmente durante os estágios iniciais de desenvolvimento, quando ocorre intensa atividade metabólica e formação dos principais órgãos vegetativos. (Veloso, 2007, p.9)

Nota-se que o zinco é um elemento essencial na ativação enzimática e na regulação hormonal das plantas. Sua deficiência compromete severamente o vigor e a formação radicular, especialmente em fases críticas de crescimento. O uso de tecnologias como o tratamento de sementes supre essa carência precocemente, permitindo que as plântulas estabeleçam seus órgãos vegetativos com saúde e resiliência.

Entre as funções mais importantes do zinco destaca-se sua participação na ativação e regulação de numerosas enzimas envolvidas em processos metabólicos essenciais. Esse micronutriente atua como componente estrutural ou cofator enzimático em reações relacionadas à síntese de proteínas, ao metabolismo dos carboidratos, à produção de energia e à integridade das membranas celulares. Além disso, o zinco está diretamente associado à manutenção da estabilidade estrutural de proteínas e ao funcionamento adequado dos mecanismos celulares responsáveis pelo crescimento e desenvolvimento das plantas. De acordo com Yadav *et al.* (2020) a disponibilidade adequada de zinco contribui para o desenvolvimento inicial das plântulas, favorecendo a formação de tecidos vegetais e o estabelecimento das plantas no campo.

A importância do zinco torna-se ainda mais evidente durante as fases iniciais do ciclo vegetativo, período em que ocorre intensa divisão celular e rápida expansão dos tecidos. Nessa etapa, o nutriente contribui para a formação adequada da parte aérea e do sistema radicular, influenciando diretamente o vigor das plântulas e a capacidade de absorção de água e nutrientes. Plantas que apresentam suprimento adequado de zinco tendem a desenvolver sistemas radiculares mais eficientes, capazes de explorar maiores volumes de solo e aumentar a tolerância a condições ambientais adversas.

Uma das funções fisiológicas mais estudadas do zinco está relacionada à sua participação na biossíntese do triptofano, aminoácido precursor do ácido indolacético, uma das principais substâncias produzidas pelas plantas. As auxinas constituem um grupo de hormônios vegetais responsáveis por regular processos relacionados à divisão, diferenciação e alongação celular. Dessa forma, a presença adequada de zinco favorece a produção de ácido indolacético, promovendo o crescimento dos tecidos vegetais e contribuindo para o desenvolvimento equilibrado da planta.

Conforme descrito por Taiz *et al.* (2017), essa relação entre zinco, triptofano e auxinas explica o interesse crescente pelo uso desse micronutriente em tratamentos destinados a estimular o crescimento inicial das culturas agrícolas.

O tratamento de sementes com zinco tem sido amplamente estudado como estratégia para melhorar o desempenho inicial das plantas. Essa prática busca disponibilizar o nutriente diretamente à semente durante o processo de germinação e emergência, garantindo que as plântulas tenham acesso ao elemento em uma fase crítica de desenvolvimento. Em diversas culturas, a aplicação de zinco via tratamento de sementes tem apresentado resultados positivos relacionados ao aumento do vigor, à melhoria do crescimento radicular e ao desenvolvimento mais uniforme das plântulas. Além disso, a disponibilidade adequada do nutriente pode contribuir para maior eficiência na absorção de outros elementos minerais e para o fortalecimento dos mecanismos fisiológicos envolvidos no crescimento vegetal.

Além de sua contribuição para o crescimento, o zinco também está relacionado à tolerância das plantas a diferentes tipos de estresses ambientais. Estudos demonstram que esse micronutriente participa da proteção celular contra danos oxidativos, atuando na manutenção de sistemas antioxidantes e auxiliando na preservação da integridade das membranas celulares. Segundo Cakmak (2005), a nutrição adequada com micronutrientes pode contribuir para a mitigação dos efeitos provocados por condições adversas, incluindo estresses abióticos como seca, salinidade e temperaturas extremas. Entretanto, os benefícios proporcionados pelo zinco dependem diretamente do equilíbrio nutricional da planta, das características genéticas da espécie e das condições ambientais de cultivo.

Apesar de sua reconhecida importância, o zinco deve ser utilizado com cautela, especialmente quando aplicado diretamente nas sementes. Como ocorre com outros nutrientes, existe uma faixa adequada de concentração capaz de promover benefícios ao crescimento vegetal. Quando utilizado em doses excessivas, o micronutriente pode provocar efeitos tóxicos, comprometendo a germinação, reduzindo o crescimento das plântulas e causando desequilíbrios fisiológicos. Concentrações elevadas podem interferir na absorção de outros nutrientes essenciais, além de provocar alterações metabólicas que prejudicam o desenvolvimento normal das plantas.

Dessa forma, a definição de doses adequadas torna-se um aspecto fundamental para o sucesso da aplicação de zinco em programas de manejo nutricional. A resposta das plantas ao tratamento depende de diversos fatores, incluindo espécie, cultivar, qualidade fisiológica das sementes, condições ambientais e disponibilidade de nutrientes no solo. Conforme ressaltado por Cakmak (2005) e Yadav *et al.* (2020), a avaliação criteriosa das doses é indispensável para maximizar os benefícios do micronutriente e evitar possíveis efeitos negativos. Assim, o uso racional do zinco representa uma importante ferramenta para promover o crescimento inicial das plantas, melhorar o estabelecimento das lavouras e contribuir para maiores níveis de produtividade agrícola.

3.4 Funções do molibdênio na fisiologia vegetal

O molibdênio (Mo) é um micronutriente essencial para o metabolismo e a fisiologia vegetal, sendo classificado como um elemento químico exigido em pequenas quantidades, mas que desempenha funções vitais para o sucesso das lavouras. Sua importância reside principalmente em atuar como cofator indispensável para enzimas que regulam o metabolismo do nitrogênio e do enxofre, processos fundamentais para a saúde e produtividade das plantas. Sua principal atuação está relacionada ao metabolismo do nitrogênio, participando como cofator de enzimas importantes, como a redutase do nitrato e a nitrogenase. Assim, mesmo em baixa concentração, sua deficiência pode comprometer o aproveitamento do nitrogênio e o desenvolvimento das plantas (Borkert, 1989; Souza *et al.*, 2022).

Portanto, a função fisiológica mais proeminente do molibdênio está ligada à assimilação do nitrogênio. Ele compõe a enzima redutase do nitrato, que é responsável por converter o nitrato absorvido pelas raízes em nitrito. Souza (2024) afirma que:

Esse nitrito é transformado em amônia para a síntese de aminoácidos e proteínas. Sem a presença adequada de Mo, a planta não consegue converter o nitrogênio em formas utilizáveis para a construção de seus tecidos, resultando em um crescimento atrofiado e baixa produtividade. (Souza, 2024, p. 407)

Percebe-se que o molibdênio atua como cofator vital da enzima redutase do nitrato. Sua presença é determinante para converter nitrogênio em amônia e proteínas. Sem esse micronutriente, o metabolismo é interrompido, impedindo a formação de novos tecidos e causando crescimento atrofiado e baixa produtividade comercial.

Além da redução do nitrato, segundo Souza (2024), o molibdênio é crucial para a fixação biológica do nitrogênio em leguminosas, como a soja, pois integra a enzima nitrogenase, que converte o nitrogênio atmosférico em formas orgânicas. O micronutriente também participa do metabolismo do enxofre através da redutase de sulfito e possui um efeito significativo na formação dos grãos-de-pólen, influenciando diretamente a capacidade reprodutiva das plantas.

Pois são inúmeros sintomas de deficiência e impacto no desenvolvimento que causa deficiência de molibdênio manifesta-se de forma severa em diversas culturas, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento, quando ocorre intensa atividade metabólica e formação de órgãos vegetativos. O primeiro indício costuma ser uma clorose generalizada entre as nervuras e a necrose de folhas mais velhas. Em brássicas, como a couve-flor e os brócolis, a falta de Mo causa o sintoma de "ponta-de-chicote", em que as folhas se tornam retorcidas e deformadas devido à redução do limbo foliar.

É importante notar que a disponibilidade de Mo no solo é fortemente influenciada pelo pH, sendo mais escasso em solos ácidos. A prática da calagem é frequentemente necessária para elevar o pH e liberar o molibdênio para absorção radicular. Por isso que as estratégias de manejo via sementes têm o fornecimento de molibdênio através do tratamento de sementes tem ganhado destaque como uma estratégia eficaz para garantir a nutrição inicial da plântula. Farooq; Wahid; Siddique (2012) abordam que as tecnologias como o condicionamento fisiológico (*seed priming*), a peliculização (*film coating*) esta última permite uma aplicação uniforme e melhor aproveitamento do nutriente, reduzindo os custos operacionais em comparação à adubação foliar ou no solo.

Pesquisas recentes realizadas pela Embrapa Algodão e a UEMA demonstram que o tratamento de sementes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) com molibdênio e

zinco é promissor para acelerar o desenvolvimento inicial da cultura. Esse tratamento mostrou-se particularmente benéfico ao favorecer um maior desenvolvimento do sistema radicular, o que auxilia a planta a tolerar melhor o estresse hídrico. Para culturas como a couve-flor, estudos indicam que doses equilibradas (como 0,5 g de Mo por kg de semente) não prejudicam a qualidade fisiológica, mantendo altos índices de germinação e vigor.

Embora essencial, a faixa entre o nível adequado e o tóxico para o molibdênio é estreita. Doses excessivas podem levar a sintomas de toxicidade, como a dificuldade de absorção de ferro e o aparecimento de clorose. Portanto, o uso de tecnologias de sementes deve ser sempre embasado em análises de solo e estudos de sensibilidade específicos para cada espécie, visando otimizar a assimilação de nitrogênio e fortalecer a resiliência vegetal desde a emergência.

A participação do molibdênio em enzimas associadas à assimilação de nitrogênio torna esse micronutriente relevante para o crescimento inicial, uma vez que o nitrogênio está diretamente relacionado à formação de tecidos e à atividade metabólica. Kaiser *et al.* (2005) destacam que o Mo está envolvido em enzimas de oxirredução e em processos fundamentais para a nutrição mineral das plantas, justificando seu estudo em programas de manejo nutricional.

Em síntese quando fornecido via tratamento de sementes, o molibdênio pode auxiliar na disponibilização inicial desse micronutriente à plântula. No entanto, assim como ocorre com outros nutrientes aplicados diretamente às sementes, a resposta depende da dose utilizada, da fonte empregada e da sensibilidade da espécie. Por isso, estudos específicos para sementes pequenas, como as de gergelim, são necessários para evitar efeitos indesejáveis (Souza *et al.* 2022.p. 88).

3.5 Qualidade fisiológica de sementes e vigor

A qualidade fisiológica das sementes e o seu vigor representam os fundamentos de uma produção agrícola bem-sucedida, especialmente em culturas que exigem um estabelecimento rápido para superar janelas climáticas limitadas. Este conceito está intrinsecamente relacionado à capacidade de originar plântulas normais, vigorosas e com bom desempenho inicial em condições adequadas de cultivo. No contexto atual, em que o tratamento de sementes com micronutrientes e bioinsumos

se torna comum, essa avaliação assume um papel crítico. Ela permite verificar se o produto aplicado, como zinco, boro ou molibdênio, favorece ou, em casos de dosagem inadequada, prejudica a germinação, a emergência e o crescimento das plântulas. Por essa razão, testes de germinação, emergência e avaliação de plântulas são utilizados como indicadores do efeito dos tratamentos sobre o potencial fisiológico das sementes (Brasil, 2009; Alves, 2022).

Diferente da germinação, que reflete o potencial sob condições ideais, o vigor das sementes é o atributo que determina a capacidade de estabelecimento das plantas em campo, principalmente quando as condições ambientais não são ideais, como na ocorrência de déficit hídrico ou oscilações térmicas. Sementes com níveis elevados de vigor tendem a apresentar uma emergência mais rápida e uniforme, o que contribui decisivamente para a formação de um estande homogêneo e resistente a pragas e doenças iniciais. Dessa forma, quando se avalia o tratamento de sementes com micronutrientes, é necessário considerar não apenas a porcentagem de germinação, mas também características de crescimento, como comprimento e massa seca das plântulas (Nakagawa, 1999; Alves, 2022).

O gergelim ilustra perfeitamente a complexidade dessa análise. Conforme Baghery diz:

A complexidade na análise do gergelim reside no fato de que, embora a espécie possua um sistema radicular robusto e tolerância relativa à desidratação, sua produtividade final é extremamente dependente de um estabelecimento inicial bem-sucedido, o qual é frequentemente desafiado por estresses abióticos em sistemas de segunda safra. (Baghery *et al.*, 2023, p. 1353).

Por ser uma cultura de expansão em sistemas de segunda safra no Brasil, ela enfrenta frequentes estresses abióticos logo após a semeadura. No caso do gergelim, por se tratar de uma semente pequena, a avaliação da qualidade fisiológica se torna ainda mais importante. Devido à reduzida área superficial, pequenas alterações na dose aplicada podem representar maior concentração do produto sobre a superfície da semente, aumentando o risco de efeitos negativos sobre a germinação. Estudos indicam que a viscosidade de certos fertilizantes pode criar barreiras físicas que dificultam a troca gasosa e a absorção de água, retardando o processo metabólico.

Assim, a resposta fisiológica das sementes deve ser analisada de forma conjunta com o desenvolvimento inicial das plântulas (Oliveira, 2019; Parsaie *et al.*, 2020).

Para mitigar esses riscos e potencializar o vigor, tecnologias como o condicionamento fisiológico (*seed priming*) e o recobrimento (peliculização e peletização) têm sido empregadas. O *priming* permite que a semente inicie as fases iniciais da germinação e ative mecanismos de reparo celular sem atingir a protrusão da radícula, o que resulta em uma plântula mais robusta. Já a peletização é especialmente útil para sementes pequenas como as de gergelim, pois aumenta sua massa (em até seis vezes), facilitando o manuseio e permitindo que nutrientes fiquem em camadas externas, reduzindo a fitotoxidez direta no embrião.

Pesquisas recentes da Embrapa demonstram que o tratamento de sementes de gergelim com zinco (Zn) e molibdênio (Mo) é promissor para acelerar o desenvolvimento, com destaque para o fortalecimento do sistema radicular em condições de seca, embora o excesso desses nutrientes possa comprometer a germinação laboratorial. Em suma, a garantia da produtividade comercial depende de um manejo que preserve os atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários da semente, assegurando que ela supere os desafios críticos da fase de emergência

3.6 Doses de micronutrientes e possível fitotoxidez

Os micronutrientes desempenham funções essenciais no metabolismo vegetal, participando de processos fisiológicos, bioquímicos e estruturais indispensáveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Entretanto, apesar de sua importância, a aplicação desses nutrientes deve ser realizada de forma criteriosa, uma vez que concentrações excessivas podem provocar efeitos negativos sobre a germinação e o crescimento inicial das plântulas. A resposta das sementes aos tratamentos com micronutrientes depende de diversos fatores, incluindo a dose aplicada, a espécie vegetal, a qualidade fisiológica das sementes e as condições ambientais de cultivo.

O excesso de micronutrientes pode comprometer o desempenho das sementes devido ao aumento da concentração de sais ou de elementos químicos em contato direto com sua superfície. Essa condição pode dificultar a absorção de água durante a embebição, etapa fundamental para o início da germinação. Como consequência, processos metabólicos essenciais podem ser retardados ou prejudicados, afetando o

desenvolvimento inicial das plântulas. Pois a determinação de doses adequadas constitui uma das etapas mais importantes em estudos envolvendo tratamento de sementes, pois o equilíbrio entre benefício e toxicidade é determinante para o sucesso da técnica (Oliveira *et al.*, 2019; Oliveira; Simonetti, 2018).

O tratamento de sementes com micronutrientes tem sido amplamente utilizado como estratégia para fornecer nutrientes de forma precoce às plantas, favorecendo o estabelecimento inicial e promovendo maior vigor das plântulas. No entanto, os resultados obtidos podem variar consideravelmente em função das características da espécie cultivada. Fatores como tamanho da semente, composição química, capacidade de absorção e sensibilidade aos nutrientes influenciam diretamente a resposta ao tratamento. Dessa forma, uma dose considerada eficiente para determinada cultura pode não apresentar o mesmo efeito em outra, tornando necessária a realização de estudos específicos para cada espécie.

Em sementes pequenas, como as de gergelim, a definição da dose adequada torna-se ainda mais importante. Devido à reduzida massa e à limitada capacidade de diluição dos produtos aplicados, existe uma margem mais estreita entre uma dose capaz de promover benefícios e uma concentração potencialmente prejudicial. Nesses casos, pequenas variações na quantidade de micronutrientes podem resultar em diferenças significativas na germinação e no crescimento das plântulas. Estudos realizados por Parsaie *et al.* (2020) e Souza *et al.* (2022) destacam que a avaliação criteriosa das doses é essencial para evitar problemas de fitotoxidez e garantir a segurança da aplicação.

A fitotoxidez ocorre quando a concentração do nutriente ultrapassa a capacidade de tolerância da semente ou da plântula, causando alterações fisiológicas que podem reduzir o vigor, comprometer o crescimento e afetar a qualidade fisiológica do material propagativo. Em muitos casos, sintomas de toxicidade não são imediatamente perceptíveis, mas podem refletir-se em menor desenvolvimento radicular, redução da emergência e menor uniformidade do estande de plantas, ou como Souza diz:

Concentrações tóxicas de micronutrientes podem se acumular e causar fitotoxidez severa, chegando a matar o embrião, uma vez que a semente em germinação não possui mecanismos fisiológicos eficientes para controlar a

entrada de elementos (como o boro) durante a embebição passiva, o que compromete drasticamente o vigor e a qualidade fisiológica do material. (Souza, 2024, p. 88)

Diante desse contexto, resultados experimentais que demonstram melhor desempenho em doses reduzidas e diminuição do crescimento ou da germinação em doses mais elevadas não devem ser interpretados como evidência de ineficiência do tratamento de sementes com micronutrientes. Pelo contrário, esses resultados indicam a necessidade de ajuste das concentrações aplicadas, buscando identificar níveis seguros e eficientes para cada situação. Conforme ressalta Tavares *et al.* (2015); Freitas (2020), doses adequadas de micronutrientes aumentam o vigor, favorecem o estabelecimento das plântulas e o desenvolvimento inicial uniforme. Assim, o sucesso do tratamento depende do equilíbrio entre suprimento nutricional e segurança fisiológica, garantindo que os nutrientes exercem seus efeitos positivos sem causar danos ao processo germinativo e ao crescimento inicial das plantas.

3.7 Tratamento de sementes com micronutrientes

O tratamento de sementes com micronutrientes constitui uma prática tecnológica que vem ganhando destaque na agricultura moderna por sua capacidade de associar proteção e nutrição desde as fases iniciais do desenvolvimento das plantas. Tradicionalmente, o tratamento de sementes é utilizado para a aplicação de produtos destinados ao controle de pragas e doenças, garantindo maior proteção durante a germinação e a emergência das plântulas. Entretanto, além dessa função fitossanitária, a técnica também pode ser empregada para fornecer nutrientes essenciais em pequenas quantidades, especialmente micronutrientes, que desempenham papel fundamental nos processos metabólicos das plantas. Segundo Alves (2022), essa estratégia representa uma alternativa eficiente para disponibilizar nutrientes logo no início do ciclo de desenvolvimento vegetal, favorecendo o estabelecimento inicial das culturas.

Os micronutrientes, embora exigidos em quantidades menores quando comparados aos macronutrientes, são indispensáveis para o crescimento adequado das plantas. Elementos como zinco, boro, manganês, cobre, ferro e molibdênio

participam de diversas reações bioquímicas relacionadas à fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e ativação enzimática. A deficiência desses nutrientes pode comprometer significativamente o desenvolvimento das plantas, principalmente nas fases iniciais, quando o sistema radicular ainda está em formação e apresenta limitada capacidade de absorção de nutrientes do solo. Entretanto, segundo o estudioso Souza diz:

A disponibilidade adequada de micronutrientes é de extrema importância para a garantia de plantas saudáveis e produtivas, pois a deficiência desses elementos, especialmente em fases iniciais, pode comprometer o alongamento de raízes e a divisão das células meristemáticas, resultando em perdas significativas na formação do estande. (Souza *et al.*, 2024. p. 88).

Nesse contexto, o tratamento de sementes surge como uma ferramenta capaz de disponibilizar micronutrientes diretamente à plântula em desenvolvimento, aumentando as chances de um crescimento inicial vigoroso.

Uma das principais vantagens da aplicação de micronutrientes via sementes está na uniformidade de distribuição. Como cada semente recebe uma quantidade semelhante do nutriente, reduz-se a variabilidade na nutrição inicial das plantas, favorecendo um estabelecimento mais homogêneo da lavoura. Além disso, essa técnica possibilita o uso de menores quantidades de fertilizantes quando comparada a outras formas de aplicação, como a adubação foliar ou diretamente no solo. Outro benefício importante é a proximidade do nutriente com a plântula, permitindo que ele esteja disponível exatamente no local onde será inicialmente demandado. Essa característica pode aumentar a eficiência do aproveitamento dos nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação, fixação no solo ou outros processos que diminuem sua disponibilidade para as plantas.

Diversos estudos têm demonstrado os efeitos positivos do tratamento de sementes com micronutrientes. Freitas *et al.* (2020); Tavares (2015), ao avaliarem sementes de milho recobertas com micronutrientes, verificaram influência significativa sobre a qualidade fisiológica das sementes e sobre o crescimento inicial das plantas. Os resultados indicaram que a técnica pode contribuir para melhorar o desempenho das plântulas, favorecendo características importantes como vigor, desenvolvimento radicular e crescimento vegetativo. Esses benefícios são especialmente relevantes

porque o estabelecimento inicial adequado das plantas influencia diretamente o potencial produtivo das culturas ao longo de todo o ciclo.

Além dos resultados observados em milho, pesquisas conduzidas por Freitas *et al.* (2020); Tavares (2020) evidenciaram o potencial da aplicação de molibdênio via tratamento de sementes. O molibdênio é um micronutriente essencial, particularmente importante para culturas leguminosas, pois participa de processos relacionados à fixação biológica de nitrogênio e ao metabolismo desse elemento nas plantas. Os autores relataram resultados promissores em diferentes culturas, demonstrando que a aplicação desse micronutriente diretamente nas sementes pode melhorar o desempenho inicial das plantas e contribuir para um desenvolvimento mais eficiente. Esses achados reforçam a importância do tratamento de sementes como estratégia nutricional complementar no manejo agrícola.

Apesar das vantagens observadas, a eficiência do tratamento de sementes com micronutrientes depende de diversos fatores. Entre eles, destaca-se a qualidade fisiológica do lote de sementes utilizado. Sementes com elevado vigor tendem a apresentar melhor resposta aos tratamentos, uma vez que possuem maior capacidade de germinação e desenvolvimento inicial. Outro aspecto relevante é a dose aplicada. Quantidades insuficientes podem não proporcionar os efeitos desejados, enquanto doses excessivas podem causar danos às sementes e às plântulas. Dessa forma, o ajuste adequado das doses é fundamental para garantir a eficácia da técnica.

Além da dose, a fonte do nutriente utilizada também influencia os resultados. Diferentes formulações apresentam características distintas quanto à solubilidade, disponibilidade e absorção pelas plantas. O volume de calda empregado durante o tratamento é outro fator importante, pois interfere na distribuição uniforme do produto sobre as sementes. Condições ambientais durante a germinação e a emergência, como temperatura, umidade e disponibilidade hídrica, também afetam a eficiência da absorção dos micronutrientes e o desempenho das plântulas. Assim, o sucesso da técnica depende da interação entre fatores fisiológicos, tecnológicos e ambientais.

A necessidade de cuidados torna-se ainda maior quando o tratamento é realizado em sementes pequenas. Nesses casos, pequenas variações na quantidade aplicada podem apresentar concentrações elevadas de micronutrientes por unidade

de massa de semente. Como consequência, aumenta o risco de efeitos tóxicos e prejuízos ao processo germinativo. Oliveira *et al.* (2019) e Parsaie (2020) destacam que a definição de doses seguras e eficientes é indispensável para evitar problemas como redução da germinação, fitotoxidez e comprometimento do crescimento inicial das plantas. O excesso de determinados micronutrientes pode causar desequilíbrios nutricionais e danos celulares, anulando os benefícios esperados da técnica.

Dessa forma, embora o tratamento de sementes com micronutrientes apresente grande potencial para melhorar o estabelecimento inicial das culturas e aumentar a eficiência nutricional, sua adoção deve ser baseada em critérios técnicos bem definidos. A escolha adequada dos nutrientes, das doses, das fontes e das condições de aplicação é essencial para maximizar os benefícios e minimizar os riscos. Os estudos disponíveis demonstram que, quando conduzida corretamente, essa prática pode contribuir para a obtenção de plântulas mais vigorosas, lavouras mais uniformes e maior eficiência no uso de nutrientes, consolidando-se como uma importante ferramenta no manejo agrícola sustentável.

3.8 Tratamento de sementes na cultura do gergelim

O tratamento de sementes é uma prática amplamente utilizada na agricultura com o objetivo de proteger as sementes, melhorar o estabelecimento das plantas e fornecer nutrientes essenciais durante as fases iniciais do desenvolvimento. No entanto, na cultura do gergelim (*Sesamum indicum*), ainda existem poucas informações sobre os efeitos do tratamento de sementes com micronutrientes, especialmente zinco e molibdênio. Essa limitação é ainda mais relevante quando se considera a relação entre o fornecimento desses nutrientes e a tolerância das plantas ao déficit hídrico, condição frequentemente observada em sistemas de produção sujeitos à irregularidade das chuvas.

O gergelim é uma cultura de importância econômica crescente devido à qualidade nutricional de suas sementes e à sua capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais. Apesar de apresentar relativa tolerância à seca quando comparado a outras culturas, períodos de deficiência hídrica durante a germinação e o estabelecimento inicial podem comprometer significativamente o crescimento das plantas, reduzindo o potencial produtivo. Nesse contexto, o tratamento de sementes

com micronutrientes surge como uma alternativa promissora para aumentar o vigor das plântulas e melhorar sua capacidade de enfrentar condições adversas logo nas fases iniciais do desenvolvimento.

Entre os micronutrientes estudados, o zinco destaca-se por desempenhar funções fundamentais no metabolismo vegetal. Esse elemento participa da ativação de diversas enzimas, da síntese de proteínas, da formação de hormônios vegetais e de processos relacionados ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas. A deficiência de zinco pode causar redução do crescimento radicular, menor desenvolvimento vegetativo e queda na produtividade. Por esse motivo, o fornecimento desse nutriente por meio do tratamento de sementes tem despertado interesse entre pesquisadores e produtores.

Estudos realizados por Oliveira (2019) avaliaram o potencial fisiológico de sementes de gergelim submetidas ao tratamento com zinco. Os resultados demonstraram que as respostas das sementes podem variar de acordo com a dose aplicada. Em determinadas concentrações, o micronutriente pode favorecer características relacionadas à germinação e ao vigor das plântulas. Entretanto, doses inadequadas podem não produzir os efeitos esperados ou até mesmo causar prejuízos ao desenvolvimento inicial. Esses resultados evidenciam a necessidade de definir níveis específicos de aplicação para a cultura do gergelim, considerando suas particularidades fisiológicas e suas exigências nutricionais.

Além do zinco, o enriquecimento das sementes com outros nutrientes também têm sido investigado como estratégia para melhorar o desempenho das plantas sob condições de estresse hídrico. Parsaie *et al.* (2020) observaram que sementes de gergelim enriquecidas com nutrientes apresentaram melhorias em características relacionadas ao vigor quando submetidas a condições de deficiência de água. Esses resultados sugerem que o tratamento de sementes pode contribuir para aumentar a resistência das plântulas durante períodos de estresse, favorecendo a emergência e o estabelecimento da cultura em ambientes menos favoráveis.

Apesar dos resultados promissores, os autores ressaltam que as informações disponíveis ainda são insuficientes para estabelecer recomendações técnicas seguras para o uso de micronutrientes em sementes de gergelim. Questões importantes, como

a definição das doses ideais e os efeitos específicos sobre o desenvolvimento radicular, ainda necessitam de investigação. O sistema radicular desempenha papel fundamental na absorção de água e nutrientes, especialmente em situações de déficit hídrico. Assim, compreender como o tratamento de sementes influencia o crescimento das raízes é essencial para avaliar a eficiência dessa prática no aumento da tolerância ao estresse.

A importância do zinco para o desenvolvimento do gergelim também foi evidenciada em estudos que analisaram formas alternativas de fornecimento desse nutriente.

O tratamento de sementes de gergelim com zinco e molibdênio apresenta-se promissor visando a acelerar o desenvolvimento inicial da cultura, com destaque para o maior desenvolvimento do sistema radicular em condições de déficit hídrico, favorecendo o estabelecimento da planta. (Reis *et al.*, 2024, p. 33).

Essa afirmação é reforçada pelo que Pink *et al.* (2020) diz ao avaliarem a fertilização com enxofre e zinco na cultura, observaram respostas positivas relacionadas ao crescimento das plantas e a características produtivas. Embora o trabalho não tenha sido direcionado especificamente ao tratamento de sementes, seus resultados reforçam a relevância do zinco para o desempenho da cultura. Da mesma forma, estudos conduzidos por Yadav *et al.* (2020) também destacam a contribuição desse micronutriente para o crescimento e a produtividade do gergelim.

Essas evidências fornecem suporte científico para o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao fornecimento de zinco nas fases iniciais do ciclo da cultura. A aplicação via sementes apresenta vantagens importantes, como a distribuição uniforme do nutriente, a utilização de pequenas quantidades de produto e a disponibilidade imediata para a plântula em desenvolvimento. Dessa forma, o tratamento de sementes pode representar uma estratégia eficiente para garantir que o micronutriente esteja presente desde os primeiros estágios de crescimento.

Diante desse cenário, a avaliação do tratamento de sementes de gergelim com zinco e molibdênio torna-se fundamental para ampliar o conhecimento sobre os efeitos desses nutrientes na germinação, no vigor e no desenvolvimento inicial das plantas. O

molibdênio, por sua vez, participa de importantes processos metabólicos relacionados ao aproveitamento do nitrogênio, podendo contribuir para o crescimento inicial e para o desempenho fisiológico da cultura.

Além dos aspectos nutricionais, a geração de informações sobre essa prática possui relevância para o manejo agrícola em regiões onde o cultivo ocorre em condições de segunda safra. Nessas áreas, a ocorrência de déficit hídrico durante fases sensíveis do desenvolvimento pode comprometer o estabelecimento da lavoura. Assim, compreender os efeitos do tratamento de sementes com micronutrientes pode auxiliar na definição de estratégias capazes de aumentar a tolerância das plantas ao estresse hídrico e melhorar a produtividade da cultura. Dessa forma, novas pesquisas são essenciais para estabelecer recomendações técnicas seguras e eficientes, contribuindo para o fortalecimento do cultivo do gergelim em diferentes condições de produção.

4 METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em três etapas. Sendo uma pesquisa bibliográfica e as duas etapas experimentais conduzidas em laboratório e casa de vegetação, na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luís, MA. As análises laboratoriais foram conduzidas no Laboratório de Análise de Sementes do Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade e os ensaios em casa de vegetação foram instalados na Fazenda Escola, ambos no Centro de Ciências Agrárias da UEMA.

No primeiro ensaio, avaliou-se a qualidade fisiológica das sementes submetidas a tratamentos com Zn e Mo. As sementes foram tratadas com diferentes doses de zinco (0; 0,5; 1,0 e 1,5 g kg⁻¹ de semente) e molibdênio (0; 0,5; 1,0 e 1,5 g kg⁻¹ de semente), em esquema fatorial 2 × 4, no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. A fonte de molibdênio foi o molibdato de sódio (Na₂ MoO₄ · 2H₂ O) e a fonte de zinco foi o sulfato de zinco (ZnSO₄). Foram utilizadas sementes da cultivar BRS Anahi. Para o tratamento, aplicou-se solução no volume de 1% em relação ao peso das sementes, com agitação por cinco minutos para uniformização.

Para avaliação da qualidade fisiológica das sementes foram realizados testes de germinação em papel e testes de emergência em areia, com obtenção de dados de porcentagem de germinação e emergência. O teste de germinação foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes, distribuídas sobre papel de germinação umedecido com água destilada na quantidade de 2,5 vezes a massa do papel seco, acondicionadas em caixas gerbox e mantidas a 25 °C por seis dias, conforme Brasil (2009). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais. A primeira contagem foi realizada aos três dias e a segunda aos seis dias. A umidade foi monitorada a cada dois dias e, quando necessário, realizou-se a reposição de água para manter as condições adequadas à germinação das sementes.

Para avaliação da emergência de plântulas, utilizaram-se 200 sementes, distribuídas em quatro repetições de 50 sementes, semeadas em caixas com areia esterilizada. A primeira contagem foi realizada aos três dias e a contagem final das plântulas normais emergidas ocorreu ao sexto dia após a semeadura. Após a contagem, foram separadas 10 plântulas por repetição, nas quais se mediram o comprimento da parte aérea e do sistema radicular, além da determinação da massa seca da parte aérea e do sistema radicular.

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e teste de médias com uso do software Sisvar (Ferreira, 2003). Essa etapa permitiu identificar as doses mais promissoras para cada micronutriente, considerando não apenas a germinação, mas também o desenvolvimento inicial das plântulas, especialmente massa seca e comprimento da parte aérea e do sistema radicular.

No segundo ensaio, após a análise dos parâmetros de qualidade fisiológica das sementes, selecionaram-se os melhores tratamentos com molibdênio e zinco para avaliar o desenvolvimento inicial das plantas e a resposta ao déficit hídrico. Esse ensaio foi instalado em casa de vegetação em esquema fatorial 4 x 2, sendo quatro tratamentos com micronutrientes (Tratamento 1 = 0 Mo e 0 Zn; Tratamento 2 = 0,5 Mo e 0,0 Zn; Tratamento 3 = 0,0 Mo e 0,5 Zn; Tratamento 4 = 0,5 Mo e 0,5 Zn) e duas condições hídricas (irrigação plena e déficit hídrico), com delineamento em blocos ao acaso e quatro repetições.

A semeadura foi realizada em vasos com capacidade para 8 litros, preenchidos com substrato formulado na proporção de 1:1:1 (latossolo, areia e substrato comercial). Foram semeadas cinco sementes por vaso e, após o desbaste, permaneceram duas plantas por vaso. O experimento foi conduzido até 35 dias após a emergência (DAE). A irrigação foi realizada com base no peso dos vasos, com reposição de água a cada três dias, elevando-se a umidade do solo à capacidade de campo. Nos tratamentos com déficit hídrico, a irrigação foi suspensa por sete dias, iniciando-se essa supressão aos 20 DAE. A adubação de plantio foi realizada conforme recomendado para a cultura.

, conforme Nakagawa (1999).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de variância (ANOVA) para os testes realizados em papel e areia com sementes de gergelim tratadas com as diferentes doses de Mo e Zn são apresentados na Tabela 1.

Na ANOVA observamos que houve efeito significativo do tratamento de sementes com diferentes doses de Zn e Mo sobre as características avaliadas, exceto para o percentual de emergência em areia entre as doses de Mo e Zn, massa seca do sistema radicular entre as doses de Mo e comprimento do sistema radicular entre as doses de Zn. Apesar das interações entre as doses de Zn e Mo apresentarem efeito significativo para algumas características, optamos por avaliar as doses de Zn e Mo de forma isolada pelo perfil complexo da interação.

Tabela 1. Análise de variância dos ensaios em laboratório com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Zn e Mo.

Fonte de variação	% Germinação no Papel	% Emergência na Areia	Massa seca Parte aérea (g)	Massa seca Raiz (g)	Comprimento Parte aérea (cm)	Comprimento Raiz (cm)
	Pr>Fc					
Zn	0,000**	0,055	0,000**	0,000**	0,000**	0,098
Mo	0,000**	0,366	0,000**	0,776	0,000**	0,000**
Zn x Mo	0,000**	0,619	0,004**	0,413	0,000**	0,000**

**Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Nas Tabelas 2 a 5 são apresentados os valores médios dos percentuais de germinação em papel e emergência em areia ao sexto dia após a semeadura, da massa seca da parte aérea e sistema radicular e do comprimento da parte aérea e sistema radicular das plântulas coletadas ao sexto dia após semeadura em areia.

Tabela 2. Valores médios dos percentuais de germinação de sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, em teste realizado em papel aos seis dias após semeadura.

*médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade.

Dose de Mo (g kg ⁻¹ de sementes)	% de germinação – Teste em papel				
	Dose de Zn (g kg ⁻¹ de sementes)				Média
	0,0	0,5	1,0	1,5	
0	90,0	86,0	87,3	84,7	87,0 ^a
0,5	93,5	86,0	88,5	77,5	86,4 ^a
1	88,0	96,0	83,5	58,0	81,4 ^b
1,5	84,7	88,7	86,7	31,0	72,8 ^c
Média	89,0 ^a	89,2 ^a	86,5 ^a	62,8 ^b	81,9

Tabela 3. Valores médios dos percentuais de emergência de sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, em teste realizado em areia aos seis dias após semeadura.

*médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade.

Dose de Mo (g kg ⁻¹ de sementes)	% de emergência – Teste em areia				
	Dose de Zn (g kg ⁻¹ de sementes)				Média
	0,0	0,5	1,0	1,5	
0	88,0	89,5	89,0	88,5	88,8 ^a
0,5	88,5	84,5	94,0	85,0	88,0 ^a
1	94,0	86,0	94,0	88,0	90,5 ^a
1,5	91,0	91,0	92,5	89,5	91,0 ^a
Média	90,4 ^a	87,8 ^a	92,4 ^a	87,8 ^a	89,6

Com base nos dados de germinação em papel e emergência em areia, podemos verificar que a partir da dose 1 g kg⁻¹ Mo e da dose 1,5 g kg⁻¹ Zn houve perda na germinação das sementes de gergelim (Tabela 2) no teste em papel, enquanto no teste em areia (Tabela 3) não houve diferença significativa entre os tratamentos conforme a ANOVA. Isso pode ter ocorrido devido ao tipo de substrato, possivelmente com melhor condição de germinação para as sementes em areia. Os

resultados do teste de germinação em papel, porém podem indicar uma possível fitotoxicidade dos micronutrientes a partir das referidas doses, o que limitaria o uso no tratamento de sementes para doses abaixo de 1 g kg⁻¹ e 1,5 g kg⁻¹ de sementes para os micronutrientes Mo e Zn, respectivamente.

Tabela 4. Valores médios de massa seca da parte aérea e sistema radicular de plântulas provenientes do teste em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, aos seis dias após semeadura.

*médias seguidas pela mesma letra na linha e na coluna não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade.

Dose de Mo (g kg ⁻¹ de sementes)	Massa seca – Parte aérea (g)					Massa seca – Raiz (g)				Média
	Dose de Zn (g kg ⁻¹ de sementes)					Dose de Zn (g kg ⁻¹ de sementes)				
	Média									
	0,0	0,5	1,0	1,5		0,0	0,5	1,0	1,5	
0	0,035	0,035	0,029	0,030	0,032 ^a	0,034	0,036	0,014	0,012	0,024 ^a
0,5	0,035	0,040	0,028	0,032	0,034 ^a	0,035	0,030	0,013	0,009	0,022 ^a
1	0,029	0,031	0,021	0,031	0,028 ^b	0,034	0,044	0,006	0,012	0,024 ^a
1,5	0,030	0,044	0,029	0,030	0,033 ^a	0,035	0,034	0,012	0,009	0,023 ^a
Média	0,032 ^b	0,038 ^a	0,027 ^c	0,031 ^b	0,032	0,034 ^a	0,036 ^a	0,011 ^b	0,011	0,023 ^b

Como os resultados do teste em areia não apresentaram diferença estatística entre os tratamentos das sementes com Mo e Zn, afim de avaliar os tratamentos, utilizou-se os dados de desenvolvimento das plântulas, parte aérea e sistema radicular, afim de verificar se houve efeito significativo dos tratamentos.

Para a massa seca da parte aérea (Tabela 4) houve diferença significativa entre as doses de Mo e Zn, sendo que os melhores resultados foram encontrados com as doses 0 e 0,5 g kg⁻¹ de sementes para ambos os micronutrientes. Para a massa seca do sistema radicular, verifica-se que as doses de Mo não influenciaram significativamente essa característica, enquanto que as doses de Zn tiveram efeito significativo, com os melhores resultados obtidos com as doses 0 e 0,5 g kg⁻¹ de sementes.

Para os dados de comprimento da parte aérea e do sistema radicular das plântulas (Tabela 5), verifica-se que para o comprimento da parte aérea houve efeito significativo tanto para as doses de Mo como para o Zn, com o melhor resultado para o Mo com a dose 0,5 g kg⁻¹ de sementes e para o Zn com as doses 0, 1 e 1,5 g kg⁻¹

de sementes. Para o comprimento do sistema radicular, apenas as doses de Mo tiveram efeito significativo, com melhores resultados com as doses 0, 0,5 e 1,5 g kg⁻¹ de sementes. Com base nos resultados apresentados, foram selecionadas as doses 0 e 0,5 g kg⁻¹ de sementes de ambos os micronutrientes, Mo e Zn, como os tratamentos com as melhores respostas, para a realização da segunda fase da pesquisa, em que tais doses foram empregadas para o tratamento das sementes e semeadura em vasos em casa de vegetação com e sem aplicação de déficit hídrico aos 20 DAE durante sete dias.

Tabela 5. Valores médios do comprimento da parte aérea e sistema radicular de plântulas provenientes do teste em areia, com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Mo e Zn, aos seis dias após semeadura.

*médias seguidas pela mesma letra na linha e na coluna não diferem significativamente entre si a 5% de probabilidade.

Dose de Mo (g kg ⁻¹ de sementes)	Comprimento – Parte aérea (cm)					Comprimento – Raiz (cm)				
	Dose de Zn (g kg ⁻¹ de sementes)					Dose de Zn (g kg ⁻¹ de sementes)				
	0,0	0,5	1,0	1,5	média	0,0	0,5	1,0	1,5	média
0	5,905	5,448	6,210	4,895	5,614b	4,968	5,138	5,320	4,328	4,938 ^a
0,5	5,823	5,600	5,950	6,173	5,886 ^a	4,895	4,655	5,203	4,725	4,869 ^a
1	5,505	5,145	5,410	6,268	5,582b	4,555	4,978	4,588	4,990	4,463b
1,5	5,760	5,630	5,235	5,805	5,608b	4,898	3,915	4,208	5,458	4,619 ^a
Média	5,748 ^a	5,456b	5,701 ^a	5,785 ^a	5,673	4,829 ^a	4,671 ^a	4,829 ^a	4,867 ^a	4,798 ^b

Na ANOVA avaliou-se os efeitos da disponibilidade hídrica (irrigação total e com déficit hídrico) e das diferentes doses de Zn e Mo sobre o desenvolvimento inicial de plantas de gergelim, irrigado e com déficit hídrico de sete dias, durante o desenvolvimento inicial, observando-se que a disponibilidade hídrica influenciou todos as características avaliadas; os tratamentos com micronutrientes influenciaram altura de plantas e massa seca do sistema radicular; já a interação entre os fatores teve efeito significativo para massa fresca da parte aérea e massa seca do sistema radicular (Tabela 6).

Tabela 6. Análise de variância para o ensaio em casa de vegetação com sementes de gergelim tratadas com diferentes doses de Zn e Mo, com e sem déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Fontes de variação		Altura de plantas	Número de folhas	Massa fresca Parte aérea	Massa seca parte aérea	Massa seca sistema
	GL				Pr>Fc	
Micronutrientes (Zn e Mo)	3	0,000**	0,0066**	0,116	0,090	0,018*
Irrigação	1	0,000**	0,0051**	0,000**	0,000**	0,000**
Bloco	3	0,507	0,1095	0,222	0,102	0,108
Micro x Irrig	3	0,135	0,0185	0,010	0,378	0,016
Erro	21					
Total	31					

**Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste F.

Como o objetivo do estudo foi avaliar a influência do tratamento de sementes com micronutrientes sobre o desenvolvimento inicial e tolerância ao déficit hídrico, foi estudado o desdobramento do fator disponibilidade hídrica dentro de cada tratamento com micronutriente (Tabelas 7 a 11).

De acordo com os resultados, pode-se apontar que o tratamento de sementes com micronutrientes não teve efeito sobre a tolerância ao déficit hídrico, visto que, quando comparado dentro de cada tratamento de doses de Zn e Mo, houve diferença entre as médias dos tratamentos irrigação total e com déficit hídrico, com maiores valores alcançados com o tratamento irrigado totalmente, demonstrando que o tratamento de sementes com as doses dos micronutrientes testadas não foi efetivo em conferir maior tolerância das plantas ao estresse hídrico na fase inicial de desenvolvimento, pois se observa uma redução no crescimento das plantas com o déficit hídrico.

Tabela 7. Valores médios da altura de plantas de gergelim aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com irrigação total e com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Médias com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Disponibilidade hídrica	Altura de plantas				Média
	(cm)				
	to com micrcutrientes				
	o x Zn)				
	Tratam	2	(M	4	
	en 1		3		
Déficit hídrico	45,67b	55,87b	51,5b	49,5b	50,63
Irrigação total	52,5 ^a	62,87 ^a	60,37 ^a	64,62 ^a	60,09
Média	49,08	59,37	55,93	57,062	55,36

Tabela 8. Valores médios de números de folhas de plantas de gergelim aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com irrigação total e com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Disponibilidade hídrica	Número de folhas				Média
	Tratamento com micronutrientes (Mo x Zn)				
	1	2	3	4	
Déficit hídrico	12,88 b	13,25 ^a	12,12 ^a	10,37b	12,15
Irrigado	15,25 ^a	12,12 ^a	13,50 ^a	13,00 ^a	13,46
Média	14,06	12,68	12,81	11,68	12,81

Médias com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 9. Valores médios da massa fresca da parte aérea de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com irrigação total e com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Disponibilidade hídrica	Massa fresca da parte aérea (g)				Média
	Tratamento com micronutrientes (Mo x Zn)				
	1	2	3	4	
Déficit hídrico	55,00 ^a	50,62 ^b	58,12 ^b	51,87 ^b	53,90
Irrigado	62,50 ^a	82,71 ^a	68,75 ^a	66,87 ^a	70,20
Total Geral	58,75	66,66	63,43	59,37	62,05

Médias com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 10. Valores médios da massa seca da parte aérea de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com irrigação total e com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Disponibilidade hídrica	Massa seca da parte aérea (g)				Média
	Tratamento com		cronutrientes (Mo x Zn)		
	mi		3	4	
	1	2			
Déficit hídrico	3,76b	3,8b	5,012b	4,77b	4,33
Irrigado	6,40 ^a	8,48 ^a	7,96 ^a	8,36 ^a	7,80
Média	5.08	6.14	6.48	6.57	6.07

Médias com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 11. Valores médios da massa seca do sistema radicular de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com irrigação total e com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Disponibilidade hídrica	Massa seca do sist. radicular (g)				Média
	Tratamento com micronutrientes (Mo x Zn)				
	1	2	3	4	
Déficit hídrico	0,45b	0,54b	0,56b	0,39b	0,49
Irrigado	0,80 ^a	1,26 ^a	0,83 ^a	1,09 ^a	0,99
Média	0,63	0,90	0,70	0,746	0,74

Médias com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Visto que os tratamentos com as doses de Zn e Mo não apresentaram efeito com relação à tolerância ao déficit hídrico, foi avaliado o desdobramento das doses de Zn e Mo dentro dos tratamentos de disponibilidade de água, irrigação total e déficit hídrico de sete dias, conforme as Tabelas 12 e 13.

Avaliando os resultados para o tratamento com irrigação total (Tabela 12), observa-se um comportamento em que os tratamentos com doses de Zn e Mo apresentaram efeito significativo, principalmente para o parâmetro altura de plantas e massa fresca e seca da parte aérea, podendo-se destacar o tratamento 2 (0,0 g/Kg Zn e 0,5 g/Kg Mo). Com relação a massa seca do sistema radicular, apesar de não apresentar diferença significativa em comparação ao tratamento testemunha (T1), também o tratamento 2 manteve um bom resultado. Isso indica

que em condições de irrigação, a aplicação de Mo pode ser indicada, via tratamento de sementes, visando um melhor desenvolvimento inicial das plantas de gergelim.

Tabela 12. Valores médios da altura de plantas, massa fresca e seca da parte aérea e massa seca do sistema radicular de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com irrigação total.

Parâmetros	Tratamentos - Doses de Zn e Mo			
	1	2	3	4
Altura de plantas	52,50b	62,87 ^a	60,37a	65,62 ^a
Massa fresca parte aérea	62,50b	82,71 ^a	68,75b	66,87b
Massa seca parte aérea	6,40b	8,48 ^a	7,96 ^a	8,36 ^a
Massa seca sist. radicular	0,45 ^a	0,54 ^a	0,56 ^a	0,39 ^a

Médias com a mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Avaliando os resultados dos tratamentos com micronutrientes dentro do tratamento com déficit hídrico (Tabela 13), observa-se um resultado semelhante ao daquele com irrigação total, com os melhores valores dentro dos parâmetros avaliados sendo apresentados com os tratamentos T2, T3 e T4 em relação a testemunha (T1), demonstrando que, apesar de os resultados no geral não ficarem próximos aos tratamentos com irrigação, em condições de déficit hídrico, existe uma melhora no desenvolvimento inicial das plantas de gergelim com o tratamento de sementes com micronutrientes, com destaque para o tratamento T2, que apresentou um bom desenvolvimento do sistema radicular, que poderá durante o ciclo de cultivo da cultura talvez auxiliar para uma maior tolerância ao déficit hídrico em fases posteriores do ciclo de cultivo.

Tabela 13. Valores médios da altura de plantas, peso fresco e seco da parte aérea e peso seco do sistema radicular de plantas de gergelim, aos 35 DAE, a partir de sementes tratadas com Mo e Zn, com déficit hídrico de sete dias (20 aos 27 DAE).

Parâmetros	Tratamentos - Doses de Zn e Mo			
	1	2	3	4
Altura de plantas	45,66b	55,87 ^a	51,50ab	49,50ab
Massa fresca parte aérea	55,00 ^a	50,62 ^a	58,12 ^a	51,87 ^a
Massa seca parte aérea	3,77 ^a	3,80 ^a	5,01 ^a	4,77 ^a
Massa seca sist. radicular	0,80b	1,26 ^a	0,83b	1,09ab

Médias com a mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Nos últimos anos, os vários estimulantes radiculares lançados no mercado para o tratamento de sementes, contendo micronutrientes, têm despertado o interesse dos produtores pela premissa de promover aumentos de produtividade ao estimular o desenvolvimento do sistema radicular. De fato, o tratamento de sementes para disponibilização de micronutrientes é uma opção que vem sendo testada em diferentes estudos, como o de Tavares *et al.* (2015) e Paraíba (2017), para a cultura do milho, e Freitas *et al.* (2020), para a cultura da soja, dentre outros estudos experimentais; e ao validar a sua eficácia, como método de fornecer micronutrientes às culturas, poder-se-ia possibilitar vantagens como facilidade, uniformidade de aplicação e boa distribuição dos nutrientes, bom aproveitamento pela planta e, principalmente, redução dos custos de aplicação desses minerais.

Um exemplo de formulação que associa o uso de agentes de ação fisiológica com micronutrientes voltada ao estabelecimento inicial das plantas, sobretudo para o desenvolvimento do sistema radicular, é o produto comercial “Improve Max” (fonte de Zn e Mo) para o tratamento de sementes de gramíneas, como o arroz, o trigo e o milho. A premissa do produto é que os micronutrientes estimulam a formação de um sistema radicular profundo e ramificado e promovam um maior equilíbrio fisiológico

evitando a desidratação das plantas devido às altas temperaturas, de modo que as plantas já iniciem o ciclo de vida com maior potencial de desenvolvimento (Simões *et al.*, 2022).

6 CONCLUSÃO

O tratamento de sementes de gergelim com Zn e Mo apresenta-se como uma ferramenta promissora para melhor desenvolvimento da cultura, com destaque para o desenvolvimento do sistema radicular em condições de déficit hídrico. As doses máximas testadas neste estudo, de 1,5 g kg⁻¹ de sementes de ambos os micronutrientes, não influenciaram negativamente a emergência em areia das sementes, enquanto as doses de 0,5 g kg⁻¹ de sementes de ambos os micronutrientes foram as que apresentaram um melhor desenvolvimento das plântulas em condições de laboratório. Para o desenvolvimento inicial da cultura em condições de casa de vegetação, os melhores resultados foram obtidos com a dose de 0,5 g kg⁻¹ Mo sem adição de Zn ou com 0,5 g kg⁻¹ Zn, mesmo em condições de irrigação total. Mais estudos devem ser realizados para avaliar o efeito dos micronutrientes também na produtividade da cultura.

REFERÊNCIAS

ALVES, R. M. Tratamento de sementes de soja com micronutrientes apresentando diferentes níveis de vigor: absorção durante a germinação e efeitos sobre o potencial fisiológico das sementes e desempenho inicial das plantas. 2022. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciências- Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022. DOI: 10.11606/D.11.2022.tde-06042022-175929.

BAHRAMI, H.; RAZMJOO, J.; OSTADI JAFARI, A. Efeito do estresse hídrico na germinação e no crescimento de plântulas de cultivares de gergelim (*Sesamum indicum* L.). *Int. J. AgriSci.* p. 423-428, 2012.

BAGHERY, M. A. *et al.* Sesame (*Sesamum indicum* L.) response to drought stress: susceptible and tolerant genotypes exhibit different physiological, biochemical, and molecular response patterns. *Physiol Mol Biol Plants*, v. 29, n. 9, p. 1353-1369, 2023.

BORKERT, C. M. Micronutrientes na planta. In: BULL, L. T.; ROSOLEM, C. A. (ed.). **Interpretação de análise química de solo e planta para fins de adubação**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1989. p. 309-329.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399 p.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, Göttingen. v. 168, n. 4, p. 521-530, 2005.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a Agropecuária: Safra 2024/25**. Brasília: CONAB, 2024.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2022/2023**. Brasília: Conab, 2023. (Oitavo Levantamento, v. 4, maio 2023). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 17 maio. 2023.

DOSSA, K. *et al.* Transcriptomic, biochemical and physio-anatomical investigations shed more light on responses to drought stress in two contrasting sesame genotypes. **Scientific Reports**. v. 7, art. 8755. 2017.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Micronutrient application through seed treatments – a review. **J. Soil Sci. Plant Nutr.**, v. 12, n. 1, p. 125-142, 2012.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. DOI 10.1590/S1413-70542011000600001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>. Acesso em: 15 out. 2025.

FREITAS, M. P. S. O. *et al.* Application of molibdenum seed treatment (TS). **Scientific Electronic Archives**, Sinop, v. 13, n. 10, p. 33-38, 2020.

KAISER, B. N. *et al.* The role of molybdenum in agricultural plant production. **Ann Bot**, Oxford, v. 96, n. 5, p. 745-754, 2005.

KOUIGHAT, M. *et al.* First report of sesame mutants tolerant to severe drought stress during germination and early seedling growth stages. **Plants (Basel)**, Basel, v. 10, n. 6, art. 1166, 2021.

LANGHAM, D. R. *et al.* **Sesame grower guide**. Texas: Sesaco, 2008. 32 p.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D. FRANÇA NETO, J. B. (org.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. cap. 2, p. 36-59.

OLIVEIRA, A. P.; SIMONETTI, A. P. M. M. Viabilidade da semente de trigo tratada com sulfato zinco e arranque inicial da cultura. **Revista Cultivando o Saber**, Cascavel, v. 1, n. 4, p. 1-10, 2018.

OLIVEIRA, T. M. **Potencial fisiológico de sementes de Sesamum indicum L. após o tratamento com o zinco**. 2019. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação

em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PARSAIE, S. *et al.* Improving sesame (*Sesamum indicum* L.) seed characteristics and vigor under drought stress by seed zinc and boron enrichment. **Iranian Journal of Seed Science and Technology**, Teerã, v. 8, n. 2, p. 113-126. 2020.

PINK, Y. *et al.* Effect of sulphur and zinc fertilization on growth, yield attributes and grain yield of sesame (*Sesamum indicum*). **Indian J Agro**, Nova Delhi, , Nova Delhi, v. 65, n. 1, p. 120-124, 2020.

REIS, J. R. M. S. *et al.* Tratamento de sementes de gergelim com molibdênio e zinco para tolerância ao déficit hídrico. In: ENCONTRO DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA ALGODÃO, 19., 2024. **Resumos [...]**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2024. p. 33.

SOUZA JÚNIOR, P. C. **Boro como atenuador dos efeitos de déficit hídrico em soja (*Glycine max* L.)**. 2021. 70 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

SOUZA, E. P. **Sementes peliculizadas e peletizadas com boro e molibdênio na qualidade fisiológica e produção da couve-flor**. 2024. 88 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Botucatu, 2024.

SOUZA, E. P. *et al.* Molibdênio no tratamento de sementes de brócolis. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 4, p. 1-11. 2022.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. p.888

TAVARES, L. C. *et al.* Qualidade fisiológica e crescimento inicial de sementes de milho recobertas com micronutrientes. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 90, n. 2, p. 156–167, 2015.

VELOSO, C. Zinco na agricultura: saiba mais sobre as funções desse nutriente nas plantas. **Verde Agritech**. Minas Gerais, 2007.

YADAV, P. *et al.* Effect of sulphur and zinc fertilization on productivity and economics of sesame (*Sesamum indicum* L.) in semi-arid conditions of Rajasthan. **Int. J. Chem. Stud.**, Nova Delhi, v. 8, n. 3, p. 675-679, 2020.