



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS E AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS (AGROECOLOGIA)**



**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO GERGELIM (*Sesamum
indicum* L.) A PARTIR DA ADUBAÇÃO COM ZINCO**

PEDRO LEANDRO DANTAS PEREIRA

BANANEIRAS - PB

2024

PEDRO LEANDRO DANTAS PEREIRA

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO GERGELIM (*Sesamum indicum* L.) A PARTIR DA ADUBAÇÃO COM ZINCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias (Agroecologia) do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias (Agroecologia)

Área de Concentração: Ciências Agrárias, Indicadores e Sistemas de Produção Sustentável

Orientador: Prof. Dr. Manoel Alexandre Diniz Neto

BANANEIRAS - PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P372b Pereira, Pedro Leandro Dantas.

Biofortificação agrônômica do gergelim (*Sesamum indicum* L.) a partir da adubação com zinco / Pedro Leandro Dantas Pereira. - Bananeiras-PB, 2024.
34 f. : il.

Orientação: Manoel Alexandre Diniz Neto.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CCHSA.

1. *Sesamum indicum* L. 2. Agroecologia. 3. Fome oculta. I. Diniz Neto, Manoel Alexandre. II. Título.

UFPB/BSPJAT

CDU 633.85 (043)

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO GERGELIM (*Sesamum indicum* L.) A PARTIR DA ADUBAÇÃO COM ZINCO

PEDRO LEANDRO DANTAS PEREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias (Agroecologia) do Centro de Ciências Humanas Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências para a obtenção do título de mestre em Ciências Agrárias (Agroecologia).

Aprovado em 30/09/2024

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Manoel Alexandre Diniz Neto
PPGCAG/CCHSA/UFPB

Profa. Dra. Albanise Barbosa Marinho
PPGCAG/CCHSA/UFPB

Dr. José Evangelista Santos Ribeiro
PPGTA/CCHSA/UFPB

Dr. José Carlos da Silva Aguiar
CNPA/EmbrapaAlgodão

Dedico a todos os meus familiares, aos meus pais Francisco das Chagas Pereira e Ana Maria Dantas Pereira por todos os ensinamentos e a minha esposa Joseane Bernardo dos Santos Pereira por toda paciência e compressão.

“Nunca desista dos seus sonhos, busque seus objetivos e siga em frente nos seus propósitos”.

Pedro Pereira

AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus pelo dom da vida, por nunca fazer eu desistir dos meus sonhos.

Aos meus pais Francisco das Chagas Pereira e Ana Maria Dantas Pereira por todo apoio e paciência momentos mais difíceis.

A minha esposa Joseane Bernardo dos Santos Pereira por todo apoio durante este este mestrado e por todo carinho, paciência, amor e dedicação nos momentos difíceis.

Aos meu orientador Professor Dr. Manoel Alexandre Diniz Neto pela paciência, confiança, incentivo em todo tempo do experimento e do curso e por ter me aceitado como seu orientando.

Aos meus filhos Pedro Leandro dos Santos Dantas, Pérola Rosana dos Santos Pereira e Tallyson Pedro de Sousa Dantas

À Universidade Federal da Paraíba pela oportunidade de qualificação no curso.

Aos Professores Dr. Alexandre Eduardo de Araujo, Diego Silva Batista, George Rodrigo Beltrão da Cruz, Italo de Souza Aquino, Fillipe Silveira Marini, Albanise Barbosa Marinho e Nair Helena Castro Arriel pelo os conhecimento adquiridos nas disciplinas lecionado por todos os senhores e senhoras.

A todos servidores que compõem a instituição, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias e a Coordenadora do curso professora Dra Belisia Lucia Moreira Toscano Diniz, bem como a secretária Neire Lima por sempre informar, tirar dúvidas, também ao técnico do laboratório de solos Everton por toda ajuda e apoio nas análises e Técnico em Agropecuária Leonardo Tals Lima de Araújo pela disponibilidade em ajudar no experimento.

Aos professores que compõem a banca Albanise Barbosa Marinho, José Evangelista Santos Ribeiro, José Carlos da Silva Aguiar e Manoel Alexandre Diniz Neto, por disponibilizarem o tempo e enriquecer o trabalho com as sugestões na correção.

SUMÁRIO

LISTADE FIGURAS.....	9
RESUMO GERAL	10
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Gergelim.....	13
2.2 Importância do zinco	14
2.3 Biofortificação	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Localização.....	15
3.2 Condução do Experimento.....	15
3.3 Variáveis Analisadas.....	16
3.4 Análise Estatística.....	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5. CONCLUSÃO.....	29
6. REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICA.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Teores de clorofila “a” de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	19
Figura 2:	Teores de clorofila “b” de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	20
Figura 3:	Teores de clorofila “total” de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	21
Figura 4:	Teores de clorofila “total” de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	22
Figura 5:	Taxa de transpiração em folhas de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	23
Figura 6:	Condutância estomática em folhas de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	24
Figura 7:	Taxa de assimilação líquida de CO ₂ em folhas de plantas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	25
Figura 8:	Concentração de zinco em folhas de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	26
Figura 9:	Concentração de zinco em caules de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	27
Figura 10:	Concentração de zinco em raízes de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	28
Figura 11:	Concentração de zinco em grãos de gergelim (<i>Sesamum indicum</i> L.) crescendo em solo contendo doses de zinco.....	28

Biofortificação agronômica do gergelim(*Sesamum indicum* L.) a partir da adubação com zinco

RESUMO: O gergelim (*Sesamum indicum* L.), pertencente à família Pedaliácea, é uma das mais antigas e amplamente utilizadas plantas oleaginosas pela humanidade. Este estudo teve como objetivo avaliar o acúmulo de zinco e os parâmetros fisiológicos em plantas de gergelim submetidas à biofortificação agronômica por meio do manejo da adubação com zinco. O experimento foi realizado em delineamento de blocos casualizados, com cinco tratamentos consistindo em diferentes níveis de zinco (1,03; 2,06; 3,09; 4,12 e 5,15 mg dm⁻³) e quatro repetições. As variáveis analisadas incluíram a concentração de zinco nos órgãos das plantas, teores de clorofila, concentração de CO₂, condutância estomática, taxas de transpiração e assimilação líquida de CO₂. A aplicação de doses crescentes de zinco promove benefícios diretos na produção de pigmentos fotossintéticos, com destaque para a clorofila "a". Doses adequadas de zinco aumentam a eficiência fotossintética, a abertura estomática e a assimilação de carbono. Dentre os órgãos das plantas de gergelim estudadas, as raízes mostraram ser o principal órgão de acumulação do zinco, enquanto os grãos se beneficiam diretamente dessa redistribuição. Com os resultados confirma-se a eficácia da biofortificação agronômica do gergelim, especialmente do acúmulo de zinco nos grãos para melhoria de sua qualidade nutricional.

Palavras- chave: *Sesamum indicum* L.. Agroecologia. Fome oculta.

Agronomic biofortification of sesame (*Sesamum indicum* L.) from zinc fertilization

ABSTRACT: Sesame (*Sesamum indicum* L.), belonging to the Pedaliaceae family, is one of the oldest and most widely used oilseed plants by humanity. This study aimed to evaluate zinc accumulation and physiological parameters in sesame plants subjected to agronomic biofortification through zinc fertilization management. The experiment was conducted in a randomized block design with five treatments consisting of different zinc levels (1.03, 2.06, 3.09, 4.12, and 5.15 mg dm⁻³) and four replications. The analyzed variables included zinc concentration in plant organs, chlorophyll content, CO₂ concentration, stomatal conductance, transpiration rates, and net CO₂ assimilation. The application of increasing zinc doses directly benefits the production of photosynthetic pigments, particularly chlorophyll "a". Adequate zinc doses enhance photosynthetic efficiency, stomatal opening, and carbon assimilation. Among the studied sesame plant organs, the roots were identified as the main zinc accumulation site, while the grains directly benefit from its redistribution. The results confirm the effectiveness of agronomic biofortification of sesame, particularly in increasing zinc accumulation in grains to improve their nutritional quality.

Key words: *Sesamum indicum* L.. Agroecology. Hidden hunger.

1. INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma cultura agrícola de fácil manejo, sendo uma alternativa viável como fonte de renda em sistemas de policultivo. Além disso, destaca-se por sua resistência à seca e ao clima quente. Sua composição apresenta, em média, 50% de óleo, o que a torna amplamente utilizada tanto na alimentação humana quanto na indústria (Arriel et al., 2007).

A demanda global por sementes e produtos derivados de gergelim tem impulsionado sua produção mundial, devido ao alto teor de óleo (44% a 58%), proteínas (18% a 25%) e carboidratos (até 13%) presente nas sementes (Tenyang et al., 2017; Ma et al., 2022).

Segundo o IBGE (2017), a produção brasileira de gergelim alcançou 4.499 toneladas, distribuídas em uma área de 8.607 hectares e 3.507 unidades agrícolas, com faturamento total de R\$ 8.341, sendo o estado do Mato Grosso o principal produtor nacional.

De acordo com a CONAB (2024), dados das safras de 2022/23 e 2023/24 indicam um aumento significativo de 107,4% na produção nacional, passando de 174,2 mil toneladas em 2022/23 para 361,3 mil toneladas em 2023/24. Nesse cenário, o estado do Mato Grosso se destaca com uma produção de 247,6 mil toneladas, seguido pelo Pará, que produziu 63,8 mil toneladas.

O zinco desempenha um papel crucial no processo de germinação das sementes e na emergência de plântulas. Ele também auxilia na proteção contra micro-organismos patogênicos presentes no solo e na infestação do sistema radicular por nematoides, conferindo maior tolerância a estresses abióticos (Cakmak, 2005). Além disso, participa de reações relacionadas à biossíntese do triptofano, precursor do ácido indol-acético, uma molécula fundamental na divisão celular e no crescimento de plântulas (Taiz et al., 2017).

Conforme a Food and Drug Administration (FDA) dos Estados Unidos, o limite tolerável de ingestão de zinco para seres humanos é de 40 mg/dia; doses superiores a esse valor podem ocasionar distúrbios (Livingstone, 2015). Para Buturi et al. (2021), o zinco é essencial para o funcionamento adequado do organismo humano, recomendando-se uma ingestão diária entre 9 e 14 mg para adultos.

A biofortificação agrônômica tem sido apresentada como uma estratégia eficaz para combater a desnutrição e melhorar a saúde global, ao aumentar tanto a concentração de nutrientes nas partes comestíveis dos alimentos quanto a produtividade das culturas (Bouis; Saltzan, 2017). Essa prática pode ser implementada por meio de técnicas agrônômicas ou melhoramento genético de plantas amplamente cultivadas para a produção de alimentos (Zaman et al., 2017).

A introdução de alimentos biofortificados pode contribuir significativamente para a redução de deficiências de micronutrientes na população mundial (Manos; Wilkinson, 2016). No entanto, pesquisas sobre biofortificação agrônômica com zinco em gergelim ainda são escassas, evidenciando a

necessidade de mais estudos envolvendo essa e outras oleaginosas de relevância econômica.

Segundo Pedraza e Sales (2015), aproximadamente 20,3% da população brasileira apresenta risco de consumir quantidades insuficientes de diversos nutrientes. Entre os principais grupos de risco encontram-se moradores de periferias urbanas, residentes de áreas rurais – especialmente das regiões Norte e Nordeste –, gestantes, crianças e idosos. Estudos indicam que a deficiência de zinco em crianças brasileiras é prevalente, com taxas variando entre 11,2% e 16,2%, configurando-se como um problema relevante de saúde pública.

A carência de zinco está associada a uma série de problemas para a saúde humana. Sua deficiência prolongada pode ocasionar anorexia, alterações comportamentais, prejuízos na memória e na capacidade de aprendizado, além de distúrbios no metabolismo da glicose e da insulina (Pedraza; Sales, 2015; Soccol et al., 2021).

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o acúmulo de zinco e os parâmetros fisiológicos em plantas de gergelim submetidas à biofortificação agrônômica por meio do manejo da adubação radicular.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Gergelim

O gergelim (*Sesamum indicum* L.), pertencente à família botânica Pedaliaceae, inclui entre suas cultivares a BRS Seda. Essa cultivar possui porte mediano, ciclo precoce de aproximadamente 90 dias e crescimento ramificado. Apresenta um teor de óleo entre 50% e 52%, com potencial produtivo de até 2.500 kg ha⁻¹ de sementes e concentração de 5,24 mg de zinco por 100 g de sementes. O cultivo da BRS Seda é recomendado para regiões com precipitação anual entre 400 e 850 mm, em solos franco-arenosos, bem drenados, férteis e com pH próximo a 7 (Arriel et al., 2009).

Considerado um alimento nutritivo, o gergelim apresenta diversas aplicações no Nordeste brasileiro. Suas sementes são amplamente utilizadas na alimentação humana em preparações como paçocas, cocadas, fubá e pé-de-moleque, podendo ser consumidas puras ou combinadas com queijos e massas. Além disso, o óleo de suas sementes pode ser extraído, e o gergelim também é valorizado na alimentação animal por seu alto teor de proteínas (39,77%) e baixo teor de fibras (4,7%) (Silva et al., 2012; Arriel et al., 2009).

A exploração do grão e do óleo de gergelim no Brasil tem demonstrado um mercado crescente (Queiroga et al., 2010). O aumento da demanda por produtos derivados dessa oleaginosa tem impulsionado a busca por cultivares mais produtivas, cuja eficiência está atrelada ao potencial genético e fisiológico das sementes, ao manejo de produção e às técnicas de colheita.

O gergelim apresenta-se como uma alternativa estratégica para diversificar culturas, ampliando a oferta de espécies no sistema produtivo e complementando a renda dos agricultores do Nordeste brasileiro, devido à sua resistência às condições edafoclimáticas da região semiárida (Silva et al., 2016). Ademais, a expansão do cultivo no Cerrado brasileiro posiciona o gergelim como componente importante em sistemas de rotação e/ou sucessão de culturas nessa região agrícola (Lopes, 2023).

De acordo com o IBGE (2017), a Paraíba produziu 9 toneladas de gergelim em uma área colhida de 34 hectares, distribuída entre 156 unidades agrícolas. O estado obteve um faturamento total de R\$ 24.000, destacando-se o município de São José da Lagoa Tapada como principal produtor.

Dados da CONAB (2024) indicam um crescimento expressivo na produção nacional de gergelim, com aumento de 107,4% entre as safras 2022/23 e 2023/24. A produção passou de 174,2 mil toneladas em 2022/23 para 361,3 mil toneladas em 2023/24. Nesse cenário, o estado do Mato Grosso lidera com 247,6 mil toneladas, seguido pelo Pará, que produziu 63,8 mil toneladas.

2.2 O zinco no solo e na planta

A produtividade das culturas agrícolas pode ser limitada devido à deficiência de micronutrientes, o que ocorre principalmente pela baixa fertilidade natural do solo, pelo uso excessivo de corretivos superficiais e pela remoção de nutrientes nas colheitas sem a devida reposição (Bortolon; Gianello, 2009). A dinâmica e a disponibilidade de zinco (Zn) no solo para as plantas são influenciadas por diversos fatores relacionados ao solo (granulometria, pH da solução, teor de matéria orgânica, umidade, temperatura, teor total de Zn, bem como os atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo), à planta (distribuição e localização das raízes no perfil do solo e o efeito rizosférico) e aos fertilizantes aplicados no manejo (tipos, formas de aplicação, íons acompanhantes do Zn e possíveis contaminantes presentes nos fertilizantes) (Han et al., 2011; Sadeghzadeh, 2013).

O pH da solução do solo é um fator crucial para a disponibilidade de Zn. Solos com pH elevado, especialmente acima de 6,5 (medido em H₂O), apresentam redução na extração de Zn pelas plantas (Rengel, 2015). A aplicação de calcário no manejo agrícola eleva o pH da solução do solo, o que pode resultar em menor disponibilidade de Zn para as plantas (Chaves; De Souza; Tito, 2008). Além do pH, outros atributos do solo, como altos teores de argila, matéria orgânica, carbonatos, e óxidos de ferro e alumínio, também intensificam a retenção de Zn nos coloides (Fageria, 2009; Linhares et al., 2010).

Considerado como fator abiótico principal da produção vegetal, o solo de uma determinada região responde pelos teores de nutrientes presentes nas plantas e, conseqüentemente, na alimentação humana e animal. Em grande parte dos casos, os vegetais representam a base para a introdução de nutrientes na cadeia alimentar. Nesse contexto, uma técnica que tem se mostrado eficaz para aumentar

a ingestão de micronutrientes pela população, especialmente entre indivíduos de baixa renda, é a biofortificação de culturas agrícolas (Kachinski; Vidigal; Ávila, 2020).

Embora os cereais representem uma parcela significativa dos alimentos consumidos mundialmente, a maioria dessas espécies vegetais não é considerada uma boa acumuladora de micronutrientes nas partes comestíveis (Cakmak et al., 2010; Graham et al., 2007; White; Broadley, 2009).

Os teores de zinco (Zn) geralmente são menores em sementes, raízes e tubérculos quando comparados às hortaliças folhosas (White; Broadley, 2011). Considerando que aproximadamente 5% das dietas atuais são compostas por espécies do grupo das brássicas (Kumssa et al., 2015), e que essas plantas não apresentam elevadas concentrações de ácido fítico, hortaliças como repolho e brócolis possuem maiores teores de Zn imediatamente biodisponível (Joy et al., 2014). Altas concentrações de fitatos nos alimentos podem inibir a absorção de nutrientes como cálcio (Ca), ferro (Fe), magnésio (Mg) e zinco (Zn) pelo intestino humano (Hurrell; Egli, 2010). Dessa forma, as hortaliças folhosas apresentam grande potencial para estudos de biofortificação com Zn, visando mitigar a desnutrição associada a esse micronutriente.

Dado o amplo consumo e produção de grãos em nível global, muitos estudos de biofortificação têm sido realizados com essas culturas, focando nos elementos mais frequentemente deficientes na dieta humana. Diversos pesquisadores já observaram aumentos nos teores de Zn em grãos e/ou nas plantas de diferentes espécies e cultivares (Cakmak et al., 2010; Souza et al., 2013b; Ram et al., 2016; Moloto et al., 2018). Nesse sentido, Kachinski, Vidigal e Ávila (2020) destacam que a eficiência da biofortificação depende de fatores como formas, épocas e doses de aplicação dos nutrientes, interações com outros elementos, tipo de solo e características genéticas específicas de cada cultivar.

O zinco é um micronutriente importante para o processo de fixação de carbono e consequentemente para a fotossíntese, portanto sua ausência pode causar disfunções enzimáticas (Hansch *et al.* 2009).

2.3 Biofortificação

A biofortificação agrônômica tem sido proposta como uma estratégia para ajudar a combater a desnutrição e melhorar a saúde da população mundial, aumentando tanto a concentração de nutrientes nas partes comestíveis dos alimentos quanto na produtividade das culturas (Bouis; Saltzan, 2017). Existe duas forma de utilizar a biofortificação que são através de práticas agrônômicas por meio de fertilização e por meio de melhoramento genético de plantas amplamente cultivadas para produção de alimentos (Zaman et al., 2017).

O zinco pode ser aplicado ao solo por meio de composto inorgânicos, quelatos sintéticos e

complexos orgânicos naturais, variando conforme teor de zinco, eficácia e custos de acordo com a cultura agrícola. Dentre as fonte inorgânica o sulfato de zinco (ZnSO_4) tem preço acessível e com alta solubilidade para uso na biofortificação agrônômica através da adubação (Alloway, 2008).

Vidigal (2020) destaca diversos estudos disponíveis na literatura sobre a concentração de zinco (Zn) nos grãos podendo ser aumentada por meio de adubações realizadas no solo e via foliar. Mao et al. (2014), ao analisarem os efeitos dessas práticas em diferentes culturas na região Central do Planalto Loess, na China, concluíram que a adubação foliar com Zn foi mais eficiente do que a adubação no solo para o aumento da concentração de Zn nas plantas.

Phattarakul et al. (2012), ao avaliarem a aplicação de Zn na cultura do arroz, observaram que a eficiência do micronutriente variou entre genótipos, evidenciando que a seleção de genótipos com maior capacidade de absorção foliar pode maximizar a deposição de Zn nos grãos.

Por outro lado, Drissi et al. (2017), ao avaliarem a adubação foliar com diferentes doses de sulfato de Zn na cultura do milho para silagem, verificaram que essa prática aumentou o teor de Zn nos tecidos vegetais, favorecendo o crescimento médio das plantas e o rendimento de silagem. Orioli Jr. et al. (2008), ao compararem diferentes formas de aplicação de Zn (solo incorporado, localizado, sementes e foliar) na cultura do trigo, destacaram que a aplicação foliar resultou no maior acúmulo de Zn na matéria seca.

Em contrapartida, Oliveira et al. (2017) recomendaram a aplicação de Zn via solo para a cultura da soja, uma vez que essa estratégia promoveu aumentos no teor foliar do micronutriente, além de efeitos positivos sobre altura das plantas, número de vagens, nós reprodutivos, diâmetro do caule e massa de 100 grãos.

Para Almeida *et al.* (2020) a fome oculta é solucionada por meio da biofortificação agrônômica, fornecendo nutriente para as plantas, seja via solo ou foliar, e as plantas, por sua vez, disponibilizando nutrientes essenciais nas partes comestíveis para alimentação humana. A fome oculta é um desafio de saúde pública mundial e segundo Monika *et al.* (2023) ocorre devido à carência de micronutrientes que afeta países em desenvolvimento devido ao crescimento populacional e a falta de recursos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização

O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Humanas Sociais e Agrárias, Campus III Bananeiras-PB localizado na microrregião do Brejo paraibano. A altitude local é de 552 m, situando-se nas coordenadas geográficas 6°41'11" de latitude sul e 35°37'41" de longitude a Oeste de Greenwich, com clima quente e úmido. A temperatura

da região varia entre a máxima de 36° C e a mínima de 18° C (IBGE, 2020). O clima, conforme de Köppen e Geiger (1928) é classificado como As' constando de quente e úmido, com período chuvoso de março a agosto e pluviosidade média de 700 a 1200 mm (Alvares et al, 2013; Francisco; Santos, 2017).

3.2 Condução do Experimento

O experimento foi realizado com a cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) cv. BRS Seda em delineamento com blocos casualizados com 5 tratamentos, constando de cinco níveis de zinco (1,03; 2,06; 3,09; 4,12 e 5,15 mg dm⁻³) com quatro repetições totalizando 20 parcelas experimentais, sendo que a dose 1,03 mg dm⁻³ neste trabalho é resultado da análise do solo, portanto, configura-se como testemunha.

A fonte utilizada foi o sulfato de zinco aplicado através de uma diluição com água destilada. Durante o ciclo de cultivo foram feita duas aplicações via solo de 50 ml por planta em intervalo de quinze dias entre as aplicações.

Foi utilizado sistema automatizado de irrigação por gotejamento, sendo ativado por 2 minutos duas vezes ao dia até atingir a capacidade de campo, sendo disponibilizado a planta cerca de 200 ml de água diário.

Para a semeadura utilizou-se vasos de polietileno com capacidade para 5 dm³ os quais foram preenchidos com solo de um Latossolo Amarelo distrófico (Embrapa, 2018). A colheita foi realizada aos cento e vinte dias após a semeadura.

Antes da instalação do experimento foram coletados amostras do solo para determinação da fertilidade do solo e encaminhadas ao Laboratório de Solos do CCHSA/UFPB. Após secagem livre à sombra, as amostras foram destorroadas e passadas em peneira de malha 200 mesh, com o intuito de padronizá-las às condições granulométricas exigidas. As análises foram realizadas conforme descrito em Embrapa (2017) e os resultados foram o seguinte. Potencial hidrogênio (pH) = 6,44; Fósforo (P) = 8,64 mgdm⁻³; Potássio (K)= 0,12cmol_cdm⁻³. Sódio (Na)= 0,16 cmol_cdm⁻³; Cálcio (Ca) = 3,10cmol_cdm⁻³; Magnésio (Mg) =1,50cmol_cdm⁻³; Alumínio (Al³⁺) = 0,00 cmol_cdm⁻³;Hidrogênio + Alumínio (H⁺+Al³⁺) = 5,78 cmol_cdm⁻³; Zinco (Zn²⁺) = 1,03 mg dm⁻³; Enxofre (S) = 16,70 mg dm⁻³; Soma de Bases (SB) = 4,88 cmol_cdm⁻³;Capacidade de Troca de Cátions (CTC) = 10,65 cmol_cdm⁻³;Percentual por Saturação de Bases (V) = 45,79% e Matéria Orgânica (M.O.) = 30,19 g kg⁻¹.

3.3 Variáveis analisadas

Foram analisadas as variáveis fisiológicas (teores de clorofila “a”, “b” e “total” e trocas gasosas) e concentrações de zinco nas raízes, caule, folhas e frutos.

Após a colheita aos 120 dias, o material vegetal (raízes, caule, grãos e folhas) foi posto à secagem utilizando-se estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura de 60° C até cessar a perda de água das amostras e apresentar peso constante. Em seguida estas foram trituradas em moinho de facas modelo Willey, obtendo aproximadamente 200 g de biomassa seca em pó. Esse material foi submetido a digestão úmida (sistema aberto) conforme metodologia de Silva (2009).

Após esse processo, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Cromatografia e Espectrometria - LaCE do CCHSA/UFPB, onde procedeu-se a quantificação de zinco nos tecidos dos órgãos das plantas através da seguinte determinação: para o preparo das soluções minerais, as amostras foram pesadas (1 g) em tubos de Kjeldhal e digeridas em 7 mL de mistura nitro-perclórica ($\text{HNO}_3\text{:HClO}_4$; 5:2) a 150° C por 5 horas. Após a digestão, a solução mineral foi diluída em água destilada e filtrada através de papel filtro qualitativo, aferindo-se o volume final para 50 mL. Para a determinação Zn nos tecidos dos órgãos das plantas, as amostras foram analisadas em espectrômetro de absorção atômica, com atomizador de chama, modelo iCE 3500 (Thermo scientific, Cambridg, Inglaterra).

O equipamento foi operado no modo de absorção atômica, utilizando lâmpadas de cátodo oco de Zn como fonte de radiação primária (Photron, Victoria, Austrália) e a correção de fundo foi feita com uma lâmpada de deutério acoplada ao equipamento. A curva padrão foi preparada com solução padrão para o elemento zinco (Specsol, São Paulo, Brasil). Os parâmetros instrumentais foram utilizados de acordo com as recomendações do fabricante e os dados foram processados utilizando-se o software SOLAAR (Thermo scientific, Cambridge, Inglaterra).

Os índices de clorofila foliar (ICF), foram mensurados com o aparelho portátil ClorofiLOG (modelo CFL 1030, FALKER), com medição digital de teores de clorofila “a”, “b” e “total”, no qual a análise foi feita no horário entre 9h às 11h através do limbo foliar das plantas (Falker,2022).

As medidas da concentração intercelular de CO_2 em folhas foram realizado através do aparelho de medição Irga (modelo LC pro- SD, ADC Bio Scientific Ltda) utilizando-se a superfície da folha das plantas de gergelim em seus respectivos tratamentos.

3.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e por meio do teste F. A partir da significância dos dados em função das doses de zinco, procedeu-se a análise de regressão testando-se os modelos polinomiais linear e quadrático. Utilizou-se o programa estatístico SAS® Studio da plataforma SAS OnDemand for Academics (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de clorofila “a” (Figura 1) apresentaram uma resposta linear à aplicação das doses de zinco, com um incremento de 0,6755 ICF para cada mg dm^{-3} de Zn aplicado ao solo. Na dosagem de $1,03 \text{ mg dm}^{-3}$, o valor estimado foi de 19,54 ICF, enquanto na dosagem de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$ atingiu 22,32 ICF, representando um aumento de 6,64% entre a menor e a maior dose de zinco aplicada.

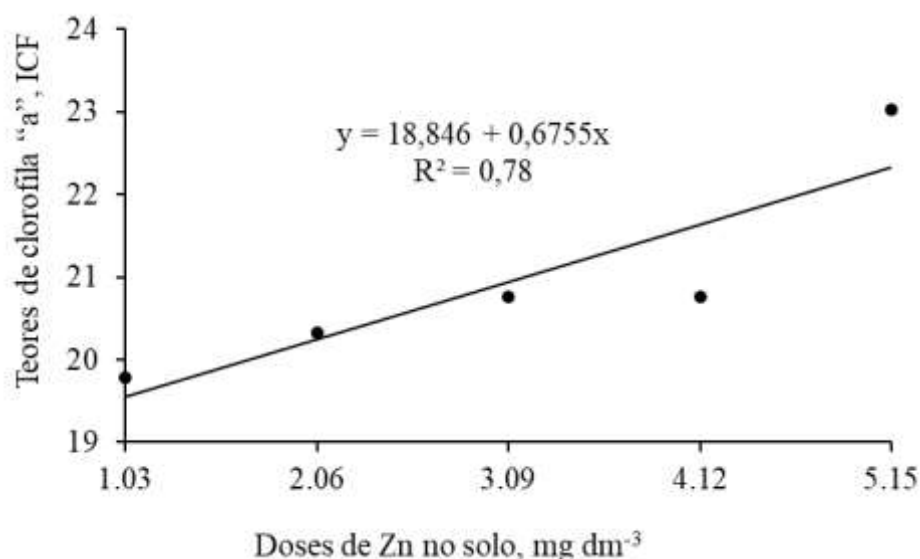


Figura 1. Teores de clorofila “a” de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Hasani et al. (2023), em estudo sobre a aplicação foliar de zinco na cultura do gergelim, observaram que concentrações de taxa fotossintética líquida, índice de área foliar, clorofila “a”, clorofila “b” e carotenoides diminuiriam proporcionalmente às reduções na água disponível no solo. Esse estresse hídrico também afetou negativamente a altura das plantas, o número de ramos por planta, o rendimento de grãos e a massa seca da parte aérea em condições de sequeiro para *S. indicum*.

Chen et al. (1999) explicam que a eficiência fotossintética das folhas depende diretamente da área foliar, do conteúdo de clorofila e da atuação de enzimas como a rubisco, que catalisa a fixação de carbono no ciclo de Calvin.

A Figura 2, no entanto, indica que os teores de clorofila “b” não foram significativamente influenciados pelas doses de zinco aplicadas. Essa estabilidade pode estar relacionada à menor sensibilidade da clorofila “b” às condições nutricionais, em comparação com a clorofila “a”.

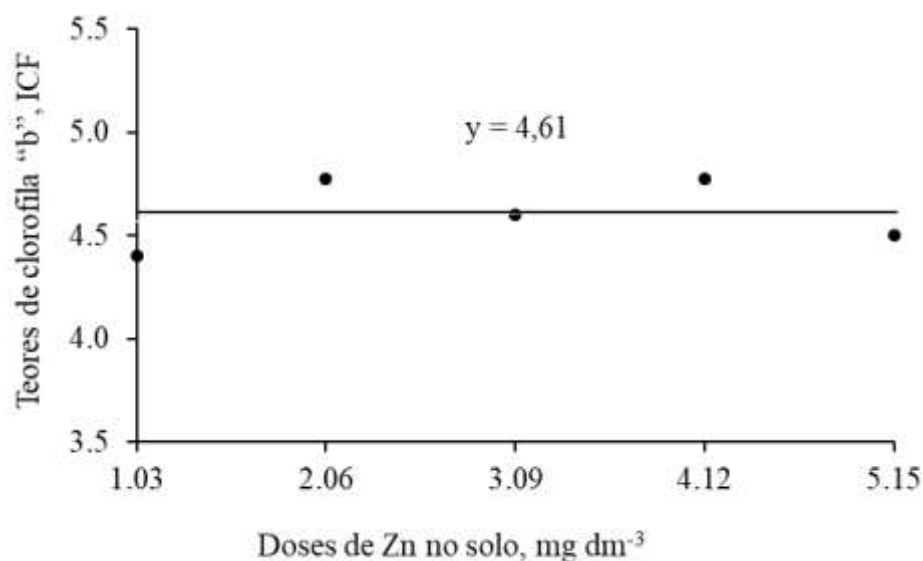


Figura 2. Teores de clorofila “b” de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Young e Britton (1990) destacaram que a relação entre clorofilas e carotenoides é sensível a condições de estresse, refletindo mudanças metabólicas que afetam os pigmentos fotossintéticos. De acordo com Taiz e Zeiger (2009), a clorofila é um indicador essencial para avaliar a senescência foliar (fotoxidação) e é amplamente utilizada como parâmetro para medir as condições ambientais às quais a planta está exposta.

Hasani et al. (2023), em um estudo sobre a aplicação foliar de zinco na cultura do gergelim, observaram que as concentrações de taxa fotossintética líquida, índice de área foliar, clorofila "a", clorofila "b" e carotenoides reduziram proporcionalmente às diminuições na água disponível no solo. Essas reduções também afetaram negativamente a altura das plantas, o número de ramos por planta, o rendimento de grãos e a massa seca da parte aérea do gergelim cultivado sob sequeiro.

Esse comportamento pode ser explicado por Chen et al. (1999), que relataram, em estudo fisiológico, que a eficiência fotossintética das folhas depende da área foliar, da concentração de clorofila e da atuação de enzimas como a rubisco, responsável pela fixação de carbono no ciclo de Calvin. No entanto, conforme indicado na Figura 2, os teores de clorofila "b" não foram significativamente influenciados pelas doses de zinco aplicadas.

Alterações na relação entre clorofilas e carotenoides são frequentemente associadas a condições de estresse, como observado por Young e Britton (1990). Taiz e Zeiger (2009) reforçam que a clorofila é um indicador foliar importante para avaliar a senescência das folhas (fotoxidação) e também é amplamente utilizada como parâmetro para medir as condições ambientais em que a planta está inserida.

Na Figura 3, os teores de clorofila total aumentaram de forma linear com as doses crescentes de

zinco. Para cada $1,03 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn aplicado ao solo, houve um incremento de 0,6949 ICF nos teores de clorofila total. Os valores estimados pela equação foram de 24,11 ICF na dose de $1,03 \text{ mg dm}^{-3}$ e de 26,97 ICF na dose de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$, representando um aumento de 5,59% entre a menor e a maior dosagem.

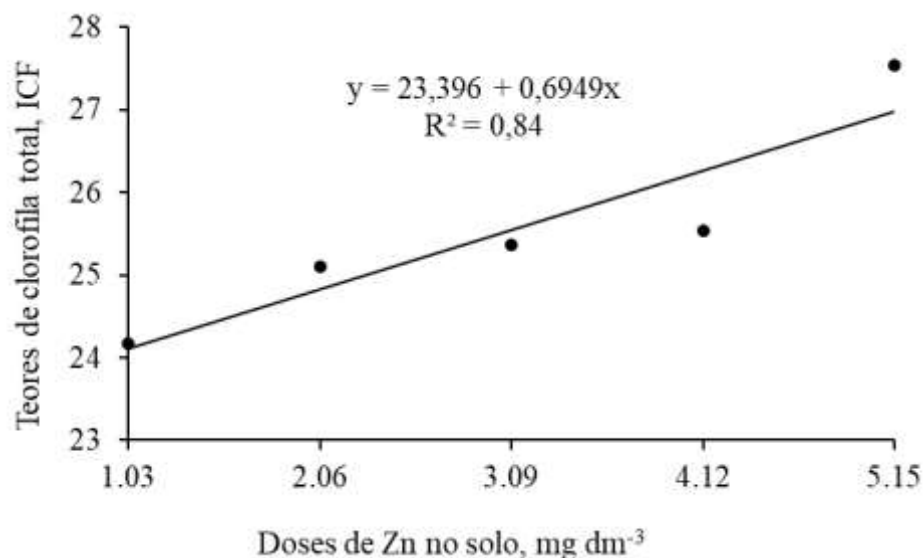


Figura 3. Teores de clorofila “total” de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Ainda segundo Hasani et al. (2023), a aplicação foliar de zinco na cultura do gergelim aumentou o teor relativo de água em plantas submetidas ao estresse hídrico, promovendo um aumento na concentração de clorofila total em folhas de plantas não estressadas. Embora, no presente experimento, todas as parcelas tenham recebido irrigação uniforme, estudos anteriores indicam que a clorofila total pode ser influenciada por condições de irrigação, o que pode, em parte, justificar a resposta linear à aplicação do Zn observada.

Em trabalho com a cultura do gergelim com aplicação foliar de zinco por Hasani et al., 2023, verificaram que a adubação com Zn levou ao aumento do teor relativo de água das plantas estressadas pela seca, com isso levou ao aumento da concentração de clorofila total nas folhas das plantas não estressadas. Embora as condições de irrigação foram iguais em todas as parcelas experimentais, estudos mostram que a clorofila total é influenciada de acordo com a aplicação ou falta de irrigação, o que pode explicar a resposta linear a aplicação do Zn.

Na Figura 4 pode-se observar que a concentração intercelular de CO_2 em folhas de gergelim apresentou resposta quadrática, e começou a aumentar a partir de $1,68 \text{ mg dm}^{-3}$, com valor máximo estimado acima de $270,45 \mu\text{mol m}^{-2}$ com a aplicação de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn aplicado ao solo.

A concentração intercelular de CO_2 (C_i) apresentou uma relação quadrática em resposta às doses de zinco, com um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 0,94$), conforme Figura 4. Houve

uma redução inicial na Ci com o aumento das doses de zinco até 1,68 mg dm^{-3} ($236,64 \mu\text{mol m}^{-2}$), seguida por um aumento em doses mais altas, cujo valor máximo estimado da variável de concentração intercelular de CO_2 em folhas de gergelim de $270,45 \mu\text{mol m}^{-2}$ foi constatado com a aplicação de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn ao solo. Isso sugere que, em concentrações crescentes de zinco, a eficiência no uso de CO_2 aumenta, mas doses excessivas (acima de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$) podem levar a uma redução na capacidade de assimilação de carbono devido a possíveis efeitos tóxicos.

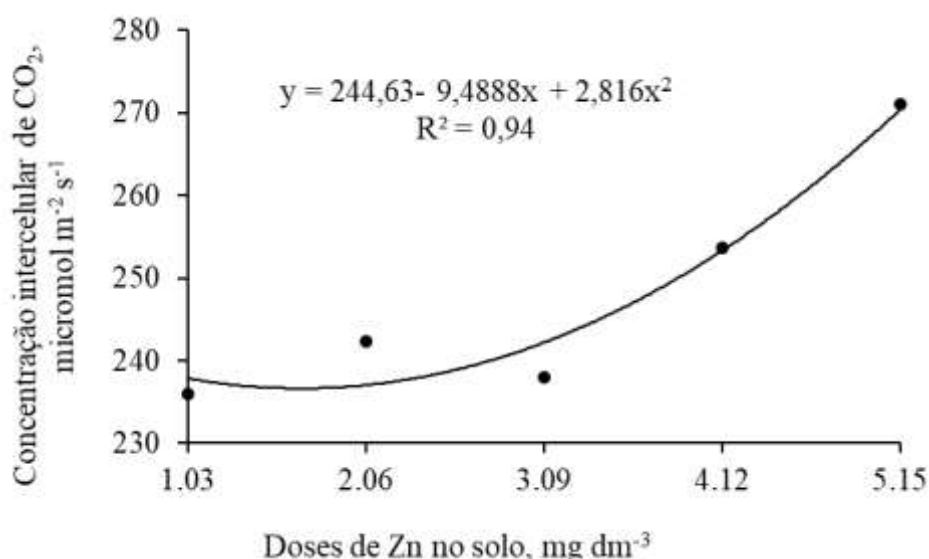


Figura 4. Concentração intercelular de CO_2 em folhas de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Babaneiras-PB, 2024.

Conforme Ikejiri (2007), a limitação estomática desempenha um papel crucial no desempenho fotossintético, uma vez que o aumento da concentração intercelular está relacionado à abertura estomática. Assim, quanto maior a abertura dos estômatos, maior será a difusão de dióxido de carbono (CO_2) para a câmara subestomática. Taiz e Zeiger (2009) destacam que a produtividade das plantas está diretamente ligada à concentração interna de CO_2 , a qual é resultado da energia solar interceptada e do CO_2 assimilado ao longo de um determinado período. Segundo os autores, na presença de luz em quantidade adequada e na ausência de fatores de estresse, as plantas tendem a apresentar concentrações internas mais elevadas de CO_2 , resultando no aumento das taxas fotossintéticas. Contudo, quando as concentrações intercelulares de CO_2 são muito baixas, ocorre uma limitação na taxa de fotossíntese.

A taxa de transpiração observado na Figura 5, também apresentou uma relação quadrática ($R^2 = 0,92$), aumentando inicialmente com o incremento das doses de zinco até um ponto de saturação ($3,644 \text{ em mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com a aplicação de $4,89 \text{ mg dm}^{-3}$), após o qual ocorre uma redução. Isso indica que o zinco, em doses moderadas, melhora a abertura estomática e, consequentemente, a perda de água por transpiração, mas doses elevadas podem causar fechamento estomático como resposta adaptativa ao estresse.

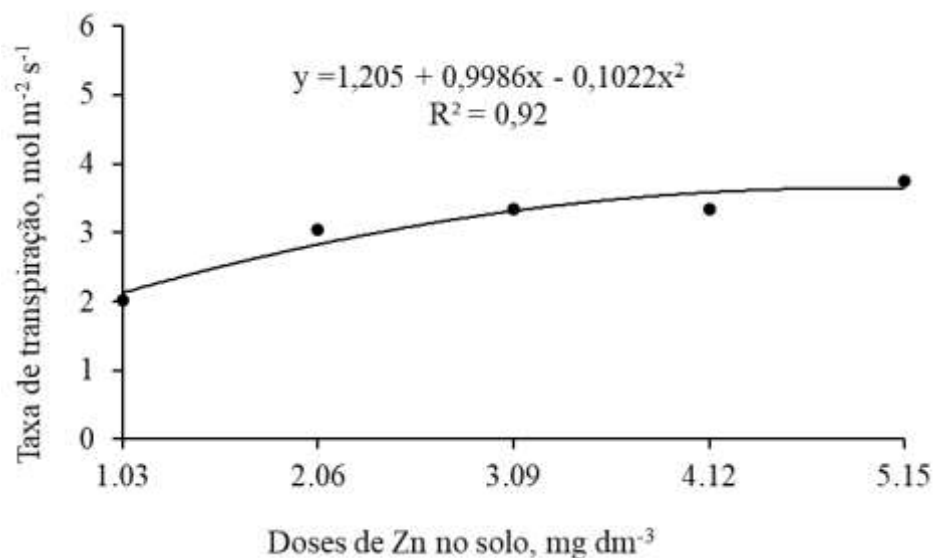


Figura 5. Taxa de transpiração em folhas de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Na cultura do milho, segundo Moreira *et al* (2021) ao avaliar doses de zinco, percebeu-se com a aplicação de 6 mg dm⁻³ de Zn, houve maior transpiração nas folhas se ajustando ao modelo linear de regressão, com incremento de 43%, quando realizada a comparação com a maior dose aplicada e a ausência da aplicação.

O padrão quadrático observado até o momento sugere que há um limite crítico de doses de zinco para promover o máximo desempenho fisiológico. Além desse ponto, os efeitos tóxicos do zinco prejudicam os processos fisiológicos das plantas.

A condutância estomática (Figura 6) apresentou resposta linear crescente à aplicação das doses de zinco, com incremento de 0,0148 em mol m⁻² s⁻¹ para cada mg dm⁻³ de Zn aplicado ao solo, partindo de 0,12 mol m⁻² s⁻¹ na menor dose (1,03 mg dm⁻³) para 0,18 mol m⁻² s⁻¹ na maior dosagem (5,15 mg dm⁻³), com incremento de 20%.

A condutância estomática aumentou linearmente com as doses de zinco ($R^2 = 0,72$), conforme Figura 6, com incrementos de 0,0148 em mol m⁻² s⁻¹ para cada mg dm⁻³ de Zn aplicado ao solo, partindo de 0,12 mol m⁻² s⁻¹ na menor dose (1,03 mg dm⁻³) para 0,18 mol m⁻² s⁻¹ na maior dosagem (5,15 mg dm⁻³), com incremento total da menor dose para a maior de 20%. Esse comportamento evidencia que o zinco favorece a abertura estomática em condições adequadas, melhorando as trocas gasosas. Contudo, a relação linear sugere que os efeitos tóxicos em doses mais altas podem não ser tão evidentes nesse parâmetro, ao menos no intervalo estudado.

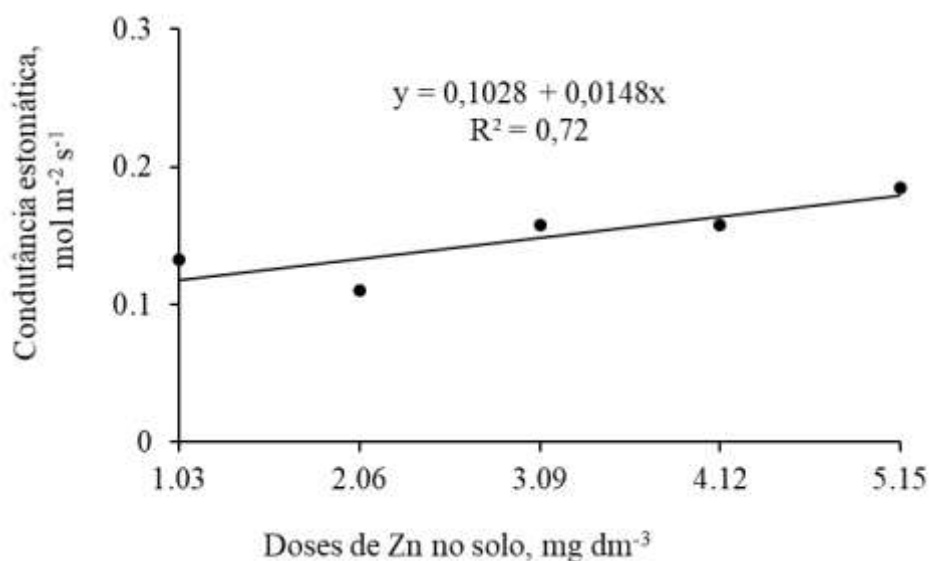


Figura 6. Condutância estomática em folhas de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Em trabalho com a cultura do milho na fase vegetativa, Moreira *et al.* (2021) verificaram que a condutância estomática foi significativa para o modelo linear de regressão, com incremento de 31% quando comparado a dose 6 mg dm⁻³ de Zn em relação à ausência da aplicação. Isso demonstra a importância do Zn na funcionalidade dos estômatos, contribuindo para a abertura estomática e trocas gasosas de espécies cultivadas.

A baixa condutância dos estômatos e eficiência de uso da água pelas plantas já foram relacionadas à falta de Zn no solo. Essa característica ocorre pelo envolvimento do Zn com o funcionamento da enzima anidrase carbônica (CA), que mantém adequados os níveis de HCO₃ nas células-guarda, controlando a captação de potássio (K⁺). Com a diminuição da atividade da CA, o influxo de K⁺ é baixo e, portanto, a forma dessas células pode mudar, interferindo no funcionamento dos estômatos (Mukhopadhyay; Mondal, 2015).

A taxa de assimilação líquida de CO₂ (Figura 7) apresentou uma resposta quadrática (R² = 0,76), semelhante à taxa de transpiração (Figura 5). Observou-se um aumento inicial com as doses de zinco, até alcançar um platô (9,83 em mol m⁻² s⁻¹ com a aplicação de 2,95 mg dm⁻³), seguido de redução em doses mais altas. Isso demonstra que o zinco estimula a fotossíntese líquida até certo limite, além do qual os efeitos tóxicos interferem negativamente nos processos metabólicos.

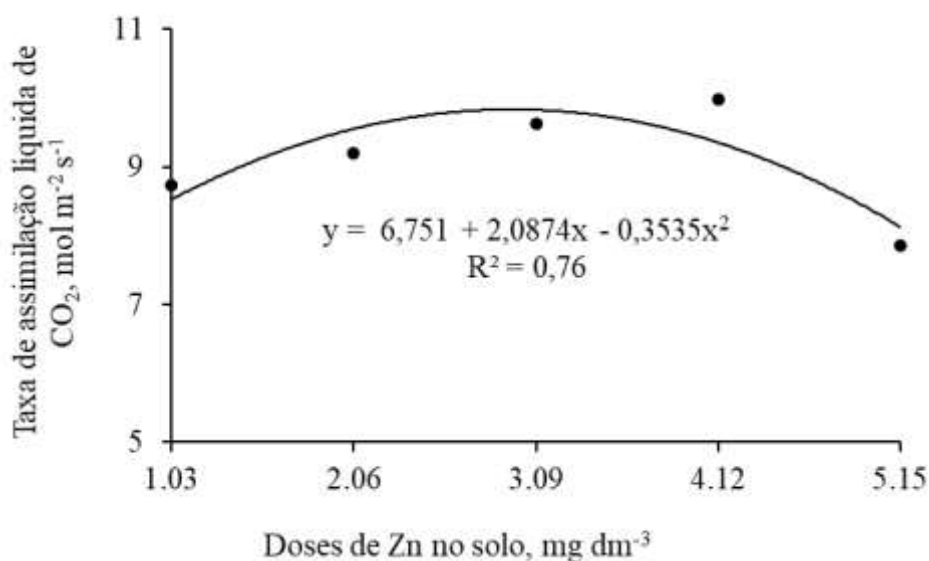


Figura 7. Taxa de assimilação líquida de CO₂ em folhas de plantas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

De acordo com Moreira *et al*, (2021) a aplicação da dose de 6 mg dm⁻³ de zinco, houve maior transpiração e condutância estomática, porém, menor taxa fotossintética, sugerindo que doses maiores de zinco interferem negativamente na assimilação do CO₂ pelas plantas de milho, mesmo que ocorra a abertura dos estômatos.

A avaliação das trocas gasosas é uma importante ferramenta na determinação de adaptação e estabilidade de plantas a determinados ecossistemas, porque a redução no crescimento e consequente redução na produtividade das plantas, podem estar relacionadas à redução na atividade fotossintética, limitada por fatores abióticos intrínsecos ao local de cultivo (Ferraz et al., 2012).

A condutância estomática (Figura 6) está positivamente correlacionada com a taxa de transpiração (Figura 5) e a taxa de assimilação líquida de CO₂ (Figura 7). Isso indica que a abertura estomática promove tanto a perda de água quanto o aumento da absorção de CO₂ em doses moderadas de zinco.

A concentração intercelular de CO₂ (Figura 4) tem uma relação inversa inicial com a taxa de assimilação líquida de CO₂ (Figura 7). Isso reflete maior eficiência na assimilação de carbono em doses intermediárias de zinco.

O padrão quadrático observado nas variáveis fisiológicas sugere que há um limite crítico de doses de zinco para promover o máximo desempenho fisiológico. Além desse ponto, os efeitos tóxicos do zinco prejudicam os processos fisiológicos das plantas. Portanto, os resultados destacam o zinco como um elemento essencial para a regulação fisiológica em plantas de gergelim. Doses adequadas de zinco aumentam a eficiência fotossintética, a abertura estomática e a assimilação de carbono, melhorando o desempenho da planta. No entanto, o manejo correto é crucial, pois doses excessivas

podem causar efeitos adversos, comprometendo a eficiência metabólica e as trocas gasosas dessa oleaginosa.

A concentração de zinco nas folhas de gergelim apresentou um comportamento quadrático ($R^2 = 0,80$) em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo (Figura 8). Inicialmente o teor de zinco nas folhas foi de 8,67 mg 100 g⁻¹, obtido com a aplicação de 1,03 mg dm⁻³, com o aumento da dose de zinco para 5,15 mg dm⁻³, o valor máximo foi de 21,71 mg 100 g⁻¹ representando um incremento de 42,92% da menor dose em relação a maior. Esse padrão pode ser atribuído a um mecanismo de regulação fisiológica, no qual doses moderadas de zinco são redistribuídas para outras partes da planta (caules, raízes e grãos), enquanto doses mais altas excedem a capacidade de redistribuição e se acumulam nas folhas.

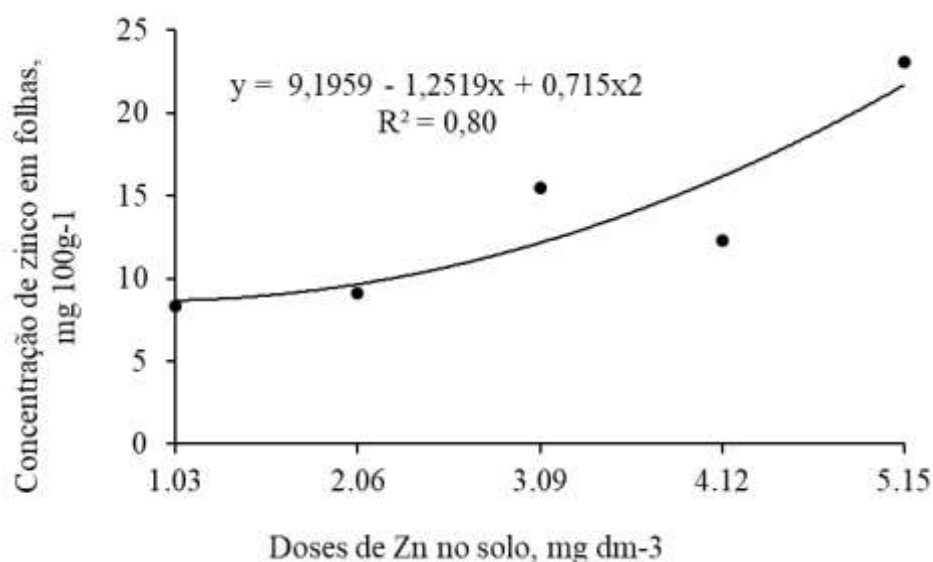


Figura 8. Concentração de zinco em folhas de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Na cultura do milho verde, Oliveira (2019) observou um aumento linear no teor de zinco nas folhas em função das doses de zinco aplicadas na biofortificação agrônômica. O maior incremento registrado foi de 84,94% para a dose mais elevada estudada em comparação à testemunha. Neste estudo, a dose de 1,03 mg dm⁻³, determinada com base na análise do solo, foi utilizada como referência para a testemunha.

De modo geral, as concentrações de zinco encontradas podem estar associadas à maior absorção do micronutriente quando aplicado em doses mais elevadas, sendo inicialmente armazenado nas partes vegetativas da planta e, posteriormente, translocado para os grãos (FERREIRA et al., 2001).

No caule, a concentração de zinco apresentou um aumento linear com as doses aplicadas, com $R^2 = 0,90$ (Figura 9). Na menor dose (1,03 mg dm⁻³) o valor estimado foi de 10,91 mg 100 g⁻¹. Para a maior dose (5,15 mg dm⁻³) o valor estimado foi de 26,33 mg 100 g⁻¹, com incremento de 41,40%. Isso

indica que os caules atuam como um importante órgão de armazenamento de zinco na planta, com acumulação direta proporcional às doses de aplicação. Esse resultado reflete o papel dos caules como via de transporte e redistribuição do micronutriente para outros órgãos.

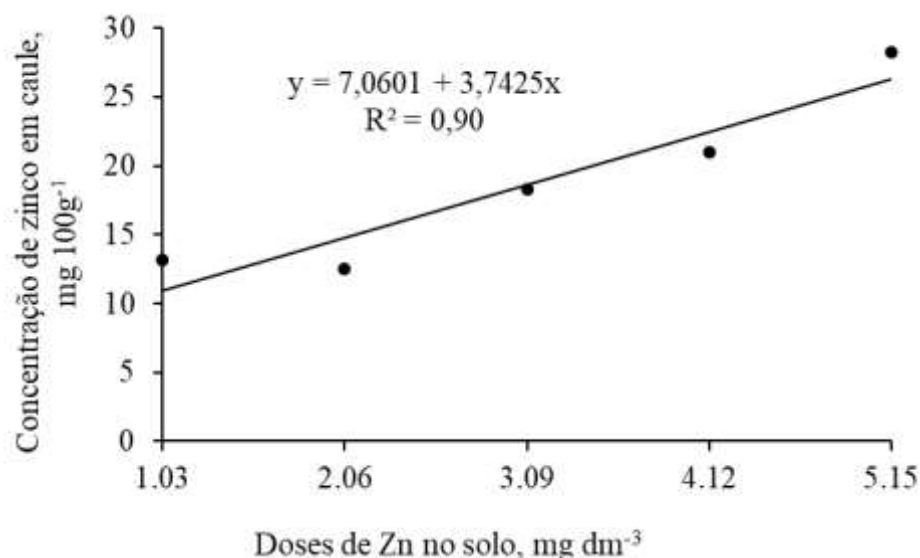


Figura 9. Concentração de zinco em caules de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Os resultados corroboram os achados de Fernandes et al. (2006), que observaram, em mudas de feijão, um aumento significativo no teor e conteúdo de zinco nas folhas e no caule das plantas em resposta a doses crescentes de fósforo e zinco, com comportamento linear.

De maneira semelhante, Chaves et al. (2009), em estudos conduzidos em ambiente controlado com a mamoneira BRS 188 Paraguaçu, constataram que a aplicação de doses crescentes de zinco resultou em um aumento progressivo nas concentrações desse micronutriente tanto nas folhas quanto no caule, variando de 14 a 43 mg kg⁻¹, respectivamente. Esses valores são considerados ideais para o desenvolvimento saudável da cultura da mamoneira.

As raízes mostraram o maior coeficiente de determinação entre as variáveis analisadas ($R^2 = 0,93$), com um aumento linear acentuado da concentração de zinco à medida que as doses no solo aumentaram (Figura 10). Na menor dose (1,03mg dm⁻³) o valor calculado foi de 9,01 mg 100 g⁻¹, passando para 28,72 mg 100 g⁻¹ para a maior dosagem (5,15 mg dm⁻¹) com um incremento de 52,24%.

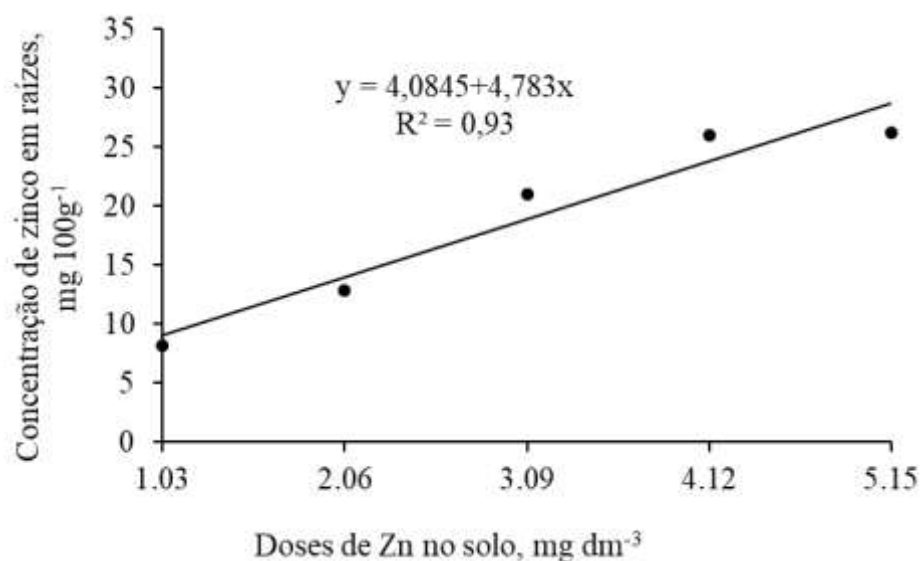


Figura 10. Concentração de zinco em raízes de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Esse comportamento destaca a função das raízes como o principal órgão de acúmulo de zinco, absorvendo e retendo quantidades significativas do micronutriente diretamente do solo, podendo-se afirmar que quando aplicado em maior quantidade, os tecidos das raízes apresentam concentrações de Zn mais elevadas em relação aos tecidos da parte aérea devido à regulação genética de absorção e transporte desse micronutriente, entre outros fatores (Gupta et al. 2016), explicando o elevado teor e acúmulo nesse órgão da planta de gergelim.

A concentração de zinco nos grãos também aumentou de forma linear, com $R^2 = 0,99$, indicando que o zinco aplicado ao solo foi eficientemente translocado para os grãos com aumento de 4,98 mg 100g⁻¹ na menor dose (1,03 mg dm⁻³) para 16,53 mg 100g⁻¹ na dose mais alta (5,15 mg dm⁻³), resultando num incremento de 53,70%.

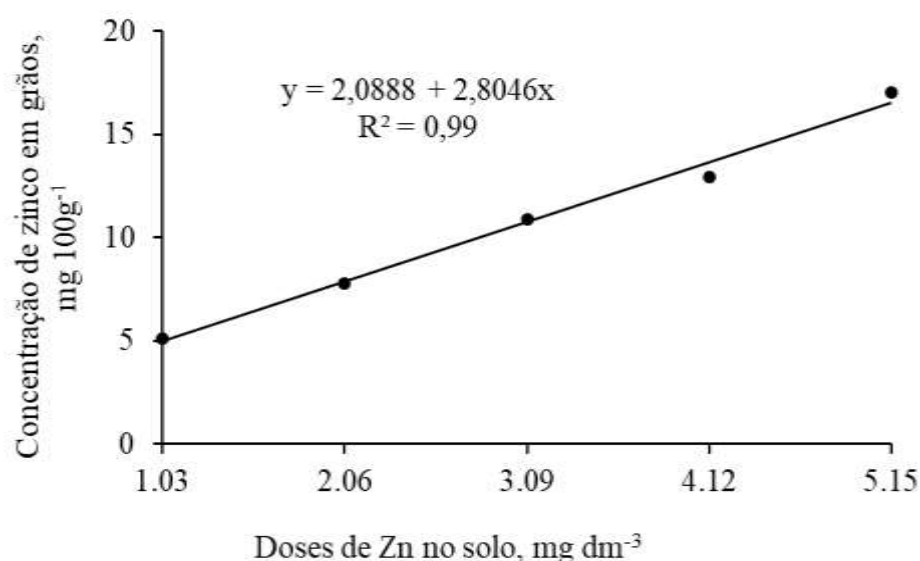


Figura 11. Concentração de zinco em grãos de gergelim (*Sesamum indicum* L.) crescendo em solo contendo doses de zinco. Bananeiras-PB, 2024.

Este é um resultado crucial do ponto de vista da biofortificação agronômica, já que o aumento de zinco nos grãos é o objetivo final para melhorar o conteúdo nutricional do produto. Valendo destacar que em trabalho realizado por Silva (2017), a soja apresentou uma resposta mais eficiente à adubação com doses de zinco aplicadas diretamente ao solo em comparação à aplicação foliar. O autor identificou uma diferença significativa entre as doses de 4 e 8 mg dm⁻³, mas destacou a necessidade de estudos adicionais para determinar a dose ideal de zinco a ser incorporada ao solo, visando aumentar os teores desse micronutriente nos grãos.

Buturi et al. (2021) ressaltaram a importância do zinco para o funcionamento adequado do organismo humano, recomendando uma ingestão diária de 9 a 14 mg para adultos. Os resultados da pesquisa indicam que um acúmulo de 16,53 mg 100 g⁻¹ nos grãos é suficiente para atender às necessidades diárias de zinco de um adulto.

De um modo geral, há uma correlação positiva clara entre as doses de zinco aplicadas e as concentrações do micronutriente nos caules, raízes e grãos (Figuras 9, 10 e 11). Isso demonstra a eficácia das doses de sulfato de zinco aplicadas ao solo como fonte de zinco e a eficiência do sistema radicular e vascular na redistribuição do nutriente. Embora, através da Figura 8, seja possível constatar uma correlação inicial negativa, indicando que doses moderadas de zinco são priorizadas para outros órgãos (raízes, caules e grãos) antes de se acumularem nas folhas. Observando a Figura 11, com o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$), evidencia a efetividade da adubação com zinco para alcançar o objetivo da biofortificação agronômica, otimizando a concentração do nutriente nos grãos.

Os resultados confirmam a eficácia da aplicação de zinco para a biofortificação agronômica do gergelim, especialmente no que se refere ao acúmulo de zinco nos grãos, que é um resultado desejado para melhorar a qualidade nutricional. As raízes mostraram ser o principal órgão de acumulação do zinco no sistema vegetativo, enquanto os grãos se beneficiam diretamente dessa redistribuição. A resposta quadrática observada nas folhas sugere uma regulação fisiológica que evita o acúmulo excessivo e direciona o nutriente para órgãos mais estratégicos. A adubação com Zn para o crescimento, desenvolvimento e produção de várias culturas agrícolas é de grande importância na fertilização, mas principalmente na biofortificação de espécies cultivadas (Fageria e Baligar, 1997; Muner et al., 2011).

5. CONCLUSÕES

A aplicação de doses crescentes de zinco promove benefícios diretos na produção de pigmentos fotossintéticos, com destaque para a clorofila "a".

Doses adequadas de zinco aumentam a eficiência fotossintética, a abertura estomática e a assimilação de carbono.

Dentre os órgãos das plantas de gergelim estudadas, as raízes mostraram ser o principal órgão de acumulação do zinco, enquanto os grãos se beneficiam diretamente na redistribuição.

Com os resultados confirma-se a eficácia da biofortificação agronômica do gergelim, especialmente do acúmulo de zinco nos grãos para melhoria de sua qualidade nutricional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLOWAY, B. J. **Zinc in soils and crop nutrition**. Brussels: IZA Publications, International Zinc Association. 2008.
- ALMEIDA, H.J. *et al.* **Soil Type and Zinc Doses in Agronomic Biofortification of Lettuce Genotypes**. *Agronomy*. 10, 124, 2020. doi:10.3390/agronomy10010124.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Koppen's climate classification map for Brasil**. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n. 6, p.711-728, 2013.
- ARRIEL, N. H. C. *et al.* **A cultura do gergelim** – Brasília, DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 72p. 2007.
- ARRIEL, N. H. C. *et al.* **Gergelim BRS Seda**, Campina Grande, PB: EMBRAPA, Empresa Brasileira de pesquisa agropecuária, 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/25691/1/FolderBRSSeda3edicao.pdf>; Acesso em: 23 set. 2024
- BORTOLON, L; GIANELLO, C. (2009). **Disponibilidade de cobre e zinco em solos do sul do Brasil**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33. ed.3, p.647–658. 2009
- BOUIS, H. E.; SALTZMAN, A. **Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from Harvest Plus**, 2003 through 2016. *Global Food Security*, v.12: p.49-58, 2017
- BUTURI, C. V. *et al.* **Mineral Biofortification of Vegetables as a Tool to Improve Human Diet. Foods**, [s.l.], v. 10, n. 2 p. 223, 2021.
- CAKMAK, Ismail. **The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants**. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 168, n. 4, p.521-530, 2005.
- CHAVES, L. H. G. *et al.* **Zinc adsorption in Argisol from Paraíba State, Brazil: effect of Ph**. *Revista Ciência Agronômica*, v. 39, n. 4, p.511-516, out-dez, 2008
- CHAVES, L. H. G. *et al.* **Efeito de Zinco e cobre no estado nutricional da mamoneira, BRS Paraguaçu**, *Revista Caatinga*, v.22, n4, p.129-135, 2009.
- CHEN. *et al.* **Effects of NaCl salinity and CO₂ enrichment on pepino (*Solanum muricatum* Ait.) II. Leaf photosynthetic properties and gas exchange**. ELSEVIER: Scientia Horticulture. 1999.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Gergelim, 12º levantamento safra 2023/24**, Setembro de 2024. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra->

de-graos .Acesso: 02/10/2024.

DE MUNER, L.H. *et al.* **Disponibilidade de zinco para milho em resposta à localização de fósforo no solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.29-36, 2011.

DRISSI, S., *et al.* **Response of corn silage (*Zea mays* L.) to zinc fertilization on a sandy soil under field and outdoor container conditions.** Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, v.16, ed. 2, p.145–153. 2017.

EMBRAPA, **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Ed.5. Revista e Ampliada. Brasília-DF. 355p. 2018.

FAGERIA, N.K. **Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, p.390-395, 2000.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C; **Responde of common bean, upland rice, corn, wheat, and soybean to soil fertility of an Oxisol.** Journal of plant Nutrition, v.20, n.10 p.1279-1289, 1997.

FALKER. **Manual técnico do ClorofiLOG modelo CFL 1030.** Porto Alegre: Falker Automação Agrícola, 2022. Disponível em: <https://www.falker.com.br/br/clorofilog>. Acesso em: 23 jan. 2025.

FERRAZ, R. L. S. *et al.* **Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v.42, p.181-188, 2012.

FERNANDES. A.R. *et al.* **Crescimento e absorção de nutrientes por mudas de Freijó (*Cordia goeldiana*) em função de doses de fósforo e de zinco.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.31, n.4, p.599-608, 2006.

FERREIRA, A. C. B. *et al.* **Características agrônômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco.** Scientia Agrícola, Piracicaba, v.58, n. 1, p.131-138, Mar., 2001.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Climatologia do Estado da Paraíba.** 1. ed. Campina Grande, EDUEFG, 2017. 75p.

GODOY, I.J. *et al.* **Programa integrado de pesquisas: oleaginosas.** São Paulo: Secretaria de

Agricultura e Abastecimento, Coordenadoria da Pesquisa Agropecuária, 1985. 13p

GUPTA, N., RAM, H., KUMAR, B. **Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v. 15, p. 89–109, 2016.

HAN, X. *et al.* **Zinc fractions and availability to soybeans in represent soils of Northeast China.** Journal of Soils and Sediments, v.11. ed.4. p.596-606, 2011.

HANSCH, R.; MENDEL, R. R. **Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl).** Plant Biology. Germania, v. 12, n. 3, p.259-266, jul. 2009.

HASANI, M. *et al.* **Foliar-applied zinc enhances sesame physiological and yield attributes under different irrigation regimes,** South African Journal of Botany, v.162, p.451-460, 2023.

HURRELL, R.; EGLI, I. **Iron bioavailability and dietary reference values.** The American Journal of Clinical Nutrition, v. 91, n. 5, p.1461S-1467S, 2010.

IBGE. **Produção de gergelim no Brasil: dados censitário – 2017.** Rio de Janeiro: IBGE, Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/gergelim/br> ; Acesso em: 23 set. 2024

IKEJIRI, L. *et al.* **Avaliação da limitação estomática e mesofílica da assimilação de CO₂ em girassol ornamental cultivado com lodo de esgoto.** Revista Brasileira de Biociências, v. 5, sulp. 2, p.855-857, 2007.

JOY, E. J., Ander *et al.* **Dietary mineral supplies in Africa.** Physiologia Plantarum, v.151, ed.3, p.208-229. 2014.

KACHINSKI, W. D.; VIDIGAL, J. C. B.; ÁVILA, F. W.; **Zinc in soil, plant and human health: a review.** Research, Society and Development, v.9, n.7, 2020.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (1928). **Klimate der Erde.** Gotha: Verlag Justus Perthes.

KUMSSA, D. B., *et al.* **Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalent.** Scientific reports, v.5, ed.1, 10974p. 2015.

LIVINGSTONE. C. **Zinc: Physiology, deficiency, and parenteral nutriotion.** Nutrition in Clinical Practice v.30. p.371-382. 2015.

LINHARES, L. A. *et al.* **Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros.** Acta Agronômica, v.59 ed.3, p.303–315. 2010.

LOPES, G. W. **Germinação e vigor de sementes de gergelim tratadas com estimulante de crescimento.** 2024. 22p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto

Federal Goiano, Iporá - GO.

MA, X. *et al.* **A comprehensive review of bioactive compounds and processing technology of sesame seed** . Oil Crop Science, v.7: p.88-94, 2022

MAO, H., Wang, *et al.*; **Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China**. Journal of Soil Acience and Plant Nutrition, p.459–470. 2014.

MANOS, M. G. L., WILKINSON, J. **Mapeamento de Controvérsias Sociotécnicas: o Caso da Biofortificação de Alimentos Básicos no Brasil**. In: Atas do 5º Congresso Ibero-Americano em investigação qualitativa, 2016

MOLOTO, R. M., *et al.* **Biofortification of common bean as a complementary approach to addressing zinc deficiency in South Africans**. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, v.68, ed.7, p.575–584. 2018

MONIKA. G. *et al.* **Biofortification: A long-term solution to improve global health- a review**. (Chemosphere. 314: 137713). 2023

MOREIRA, V. O. G. **Doses de zinco e de boro e efeitos nas trocas gasosas durante a fase vegetativa do milho**, Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 3, p.639-650, 2021.

MUKHOPADHYAY, M.; MONDAL, T. R. **Effect of zinc and boron on growth a water relations of Camellia sinensis L. O. kuntze cv. T-78**. National Academy Science Letters, Índia, v. 38, n. 3, p.283-286, jun. 2015

MUNER, L. H. D. *et al.*; **Disponibilidade de zinco para milho em resposta à localização de fósforo no solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, ed.1, p.29-38. 2011.

OLIVEIRA, F. S.; **Biofortificação agrônômica do milho verde com ferro e zinco**. 2019. 49p. Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, PB.

OLIVEIRA, F. C. De. *et al.* **Diferentes doses e épocas de aplicação de zinco na cultura da soja**. Revista de Agricultura Neotropical, p.28–35. 2017.

ORIOLI JR., V. *et al.* **Modos de aplicação de zinco na nutrição e na produção de massa seca de plantas de trigo**. Revista de la ciencia, v.8, ed. 1, p.28–36, 2008.

PEDRAZA, D. F., & SALES, M. C. **Deficiência de zinco: diagnóstico, estimativas do Brasil e prevenção**. Nutrire. V. 40. ed.3, p.397-408. 2015

- PHATTARAKUL, N. *et al.* **Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries.** Plant and Soil, v. 361, ed. 1-2, p.131–141. 2012.
- QUEIROGA, V.P. *et al.* **Colheita manual e diferentes formas de aproveitamento de grãos de gergelim.** Revista Agro@mbiente On-line, v. 4, n. 2, p.110-117, jul-dez, 2010
- RAM, H., *et al.* **Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries.** Plant and soil, v.403, ed. 1-2, p.389-401. 2016.
- RENGEL, Z. **Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere.** *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 15, n. 2, p.397–409, 2015. DOI:10.4067/S0718-95162015005000036.
- SADEGHZADEH, B. **A review of zinc nutrition and plant breeding.** *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v.13. ed. 4. p.905-927, 2013.
- SAVY FILHO, A; BANZATTO, N.V.; LASCA, D.H. C. **Gergelim IAC-OURO.** Campinas: CATI/IAC. Folder. 1983
- SHIM, W.S, *et al.* **The association of total and differential white blood cell count with metabolic syndrome in type 2 diabetic patients.** *Diabetes Res Clin Pract.* p.284-91. 2006.
- SILVA, Fábio Cesar *et al.* **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.
- SILVA, G. C. C; **Biofortificação de Soja com zinco** – Dissertação (Mestrado em Solo e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017. 22p.
- SOCOL, C. P. *et al.* **Alimentos biofortificados no Brasil e sua importância no combate à fome oculta.** IFSC: Câmpus Xanxerê. 2021.
- SOUZA, G. A., *et al.* **Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings.** *Plant science*, ed.210, p.206-213. 2013b
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.
- TAIZ, Lincoln *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal.** 6 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2017. 858p.
- TENYANG, N. *et al.* **Effects of boiling and roasting on proximate composition , lipid oxidation , fatty acid profile and mineral content of two sesame varieties commercialized and consumed in Far-North Region of Cameroon.** *Food Chemistry*, v. 221: p.1308-1316, 2017.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. **Physiological limits to zinc biofortification of edible crops.** Frontiers in Plant Science, v.2, p.1-11. 2011.

YOUNG, A.; BRITTON, G. **Carotenoids and stress.** In: Alscher, R. G., Cummings, J. R. Stress responses in plants: Adaptation and acclimation mechanisms. New York: Wiley-Liss, 1990, p.87-112

ZAMAN, Q. U. *et al.* **Zinc biofortification in rice: leveraging agriculture to moderate hidden hunger in developing countries.** Archives of Agronomy and Soil Science, v.64. ed. 2, p.147-161. 2017.