

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

MAIRON NEVES DE FIGUEIREDO

**BIOFORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) POR MEIO DA
APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO ASSOCIADO AO ÁCIDO CÍTRICO**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

MAIRON NEVES DE FIGUEIREDO

**BIOFORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) POR MEIO DA
APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO ASSOCIADO AO ÁCIDO CÍTRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Masgister Scientiae*.

Orientador: Renildes Lúcio Ferreira Fontes

Coorientador: Edson Marcio Mattiello

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F475b Figueiredo, Mairon Neves de, 1996-
2022 Biofortificação do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio da aplicação foliar de zinco associado ao ácido cítrico / Mairon Neves de Figueiredo. – Viçosa, MG, 2022.

1 dissertação eletrônica (52 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Renildes Lúcio Ferreira Fontes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 2022.

Referências bibliográficas: f. 42-49.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.308>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Feijão - Nutrição - Efeito do zinco. 2. Ácidos orgânicos. 3. Micronutrientes. 4. Feijão - Adubos e fertilizantes. I. Fontes, Renildes Lúcio Ferreira, 1957-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 635.652

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB6/2552

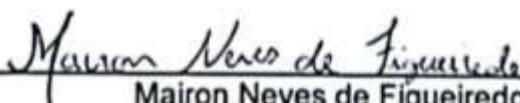
MAIRON NEVES DE FIGUEIREDO

**BIOFORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) POR MEIO DA
APLICAÇÃO FOLIAR DE ZINCO ASSOCIADO AO ÁCIDO CÍTRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2022.

Assentimento:



Mairon Neves de Figueiredo
Autor



Renildes Lúcio Ferreira Fontes
Orientador

AGRADECIMENTOS

No princípio, tudo era escuridão, até que Deus disse: “faça-se a luz!”

O tempo passou....rápido. Noites em claro, sem sono, dias em claro, sem sono e sem ânimo. As ideias sempre fluíam embaraçadas, e diante de tantas opções, a sensação de não ter feito a escolha perfeita.

Diante de tantos desafios e adversidades, me vi confuso, tomado por incertezas e a dúvida de como seria mais esse laborioso ciclo, mas com convicção do quão seria saboroso esse período de experiências e aprendizado. Entre erros e acertos, buscando sempre uma melhoria contínua, aprendendo e tentando sempre fazer o melhor.

Me coloquei a certeza de que era possível fazer o possível e que lutar pelo impossível só dependia do Eu. O Eu que se resume no resultado de amigos, mestres, professores, colegas, conhecidos e principalmente em família.

No início tudo parecia tão distante, longe, intangível, hoje vivo com o presente e posso me agraciar com as conquistas de um sonho,

Muito obrigado e bom trabalho!

Agradeço por ter chegado até aqui,

Ao IFNMG, por ter me dado as bases do conhecimento, e reforçado a ideia de que era possível ir longe.

À renomada Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a graduação e pós-graduação e tornar cada sonho em uma conquista real.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos e apoio em todo o trabalho e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio - Código de Financiamento 001.

Gratidão!

**“Alguns homens veem as coisas como são, e dizem 'Por quê?'
Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo 'Por que não?'"**

(George Bernard Shaw)

RESUMO

FIGUEIREDO, Mairon Neves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Biofortificação do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio da aplicação foliar de zinco associado ao ácido cítrico**. Orientador: Renildes Lúcio Ferreira Fontes. Coorientador: Edson Marcio Mattiello.

A deficiência de zinco (Zn) tem provocado sérios problemas de saúde pública referentes à desnutrição. Grande parte dos solos do mundo apresentam deficiência deste elemento, limitando sua presença nos produtos agrícolas e seu acesso pela população. Assim, é preciso buscar alternativas para aumentar o teor de Zn nos produtos agrícolas, elevando a qualidade nutricional dos alimentos. Diante disso, são necessárias estratégias que aumentem a eficiência da biofortificação, e estudos de como compostos orgânicos, como o ácido cítrico (AC), podem melhorar o processo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de doses de Zn e AC na biofortificação agrônômica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), visando acúmulo de Zn e outros nutrientes nos grãos. O experimento foi conduzido em casa de vegetação sob delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 4×4 , correspondendo a quatro doses de ácido cítrico (0, 50, 100, 200, g ha⁻¹) e quatro doses de Zn (0, 10, 20, 30 kg ha⁻¹) com três repetições. As unidades experimentais foram compostas por duas plantas de feijoeiro, cultivadas em vaso, sendo os tratamentos foliares aplicados no estágio R8 do feijoeiro (enchimento dos grãos). Ao atingirem o fim do ciclo as plantas foram colhidas, sendo avaliados os componentes da produtividade de grãos, o número de vagens (NV), número grãos por vagem (NGV), peso de cem grãos (PCG). Em seguida foram determinados os teores de zinco, proteína, enxofre, ferro, manganês e cobre nos grãos. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) sendo criados modelos de regressão em resposta aos tratamentos. Não houveram efeitos significativos dos tratamentos sob os componentes da produtividade (NV, NGV, PCG). As doses de 24 kg ha⁻¹ de Zn e 132,4 g ha⁻¹ de AC aumentaram os teores de Zn nos grãos de 35 mg kg⁻¹ para 79,6 mg kg⁻¹. Do mesmo modo, essas doses que associadas correspondem a máxima elevação dos teores de zinco nos grãos também resultaram no incremento de outros compostos nos grãos. O uso das doses de máxima eficiência na biofortificação com Zn aumentaram os teores de proteína dos grãos, bem como aumentaram em cerca de 45,75 % de os teores de S, 18,92 % do Fe, 22,84 % de Cu e 19,1 % de Mn. Logo, os

tratamentos com doses de Zn e AC aplicados via foliar, apresentaram efeitos positivos sobre a biofortificação agrônômica com Zn, promovendo simultaneamente incrementos nos teores de outros nutrientes.

Palavras-chave: Zinco nos grãos. Ácidos orgânicos. Micronutrientes.

ABSTRACT

FIGUEIREDO, Mairon Neves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Bean biofortification (*Phaseolus vulgaris* L.) through foliar application of zinc associated with citric acid.** Advisor: Renildes Lúcio Ferreira Fontes. Co-advisor: Edson Marcio Mattiello.

Zinc (Zn) deficiency has caused serious public health problems related to malnutrition. Much of the world's soils are deficient in this element, limiting their presence in agricultural products and their access by the population. Thus, it is necessary to seek alternatives to increase the Zn content in agricultural products, increasing the nutritional quality of food. Therefore, strategies are needed to increase the efficiency of biofortification, and studies on how organic compounds, such as citric acid (CA), can improve the process. Thus, the objective of this work was to evaluate the effects of the application of doses of Zn and CA in the agronomic biofortification of beans (*Phaseolus vulgaris* L.), aiming at the accumulation of Zn and other nutrients in the grains. The experiment was carried out in a greenhouse under a randomized block design in a 4 × 4 factorial scheme, corresponding to four doses of citric acid (0, 50, 100, 200, g ha⁻¹) and four doses of Zn (0, 10, 20, 30 kg ha⁻¹) with three replications. The experimental units consisted of two bean plants, grown in pots, and the foliar treatments were applied at the R8 stage of the bean plant (grain filling). Upon reaching the end of the cycle, the plants were harvested, and the components of grain yield, the number of pods (NV), number of grains per pod (NGV), weight of one hundred grains (PCG) were evaluated. Then, the levels of zinc, protein, sulfur, iron, manganese and copper in the grains were determined. Data were submitted to analysis of variance (ANOVA) and treatment response models were created. There were no significant effects of treatments on productivity components (NV, NGV, PCG). The doses of 24 kg ha⁻¹ of Zn and 132.4 g ha⁻¹ of CA increased the levels of Zn in the grain from 35 mg kg⁻¹ to 79.6 mg kg⁻¹. In the same way, these doses, which associated with the maximum elevation of zinc contents in the grain, also resulted in the increase of other compounds in the grains. The use of maximum efficiency doses in biofortification with Zn increased the protein contents of the grains, as well as increased by about 45.75 % of the contents of S, 18.92 % of Fe, 22.84 % of Cu and 19.1 % Mn. Therefore, treatments

with doses of Zn and CA applied via foliar showed positive effects on agronomic biofortification with Zn, simultaneously promoting increases in the levels of other nutrients.

Keywords: Zinc in the grains. Organic acids. Micronutrients.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1. Produção de Alimentos	12
2.2. Zinco na alimentação humana.....	13
2.3. Zinco no solo e na planta.....	15
2.4. Biofortificação	16
2.5. O feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	18
2.6. Ácido cítrico.....	19
2.7. Adubação foliar.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Design experimental	23
3.2. Análises em plantas.....	25
3.3. Análises estatísticas	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Produção de grãos e seus componentes.....	26
4.2. Zn nos grãos	27
4.3. Proteína nos grãos.....	30
4.4. Efeito de doses de Zn e AC sobre outros nutrientes nos grãos.....	34
5. CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICES	50

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial, vem aumentando a pressão pela necessidade de uma maior produção de alimentos. Os avanços tecnológicos na agricultura têm importante papel no aumento dessa produção de alimentos que buscam atender à crescente demanda alimentar de forma sustentável (FESS; KOTCON; BENEDITO, 2011). Entretanto, o foco no aumento da produção, em atender demandas quantitativas de alimentos reteve os avanços na busca por melhorias nutricionais dos alimentos (DWIVEDI *et al.*, 2017).

A deficiência de micronutrientes como Fe, Zn, Se e I pelas populações podem refletir problemas de mal nutrição humana, principalmente em países de baixa e média renda. Os resultados desse desbalanço nutricional é a fome oculta de micronutrientes, sendo que, há uma década, quase um quarto da população mundial era portadora de algum distúrbio relacionado à deficiência de micronutrientes (SIGHT and LIFE, 2012). Ainda hoje, boa parte da população ainda que consiga obter calorias satisfatórias de suas fontes alimentares, tem sua demanda diária de micronutrientes abaixo dos níveis recomendados (SZEREMENT *et al.*, 2022).

O Zn é essencial à saúde humana, compondo diversas enzimas e hormônios, atuando como regulador dos sistemas reprodutivo, imunológico, neurotransmissor, na sinalização intestinal, crescimento corporal, etc. (DEBJIT BHOWMIK, CHIRANJIB, 2010; WESSELS; RINK, 2020). A demanda diária de Zn na alimentação varia de 8 a 13 mg dia⁻¹ a depender do sexo, faixa etária e categoria, estando nos alimentos a principal fonte de aquisição (HAMBIDGE *et al.*, 2008). Apesar dos benefícios comprovados da nutrição adequada com Zn, uma parcela significativa da população mundial ainda permanece sob risco ou alguma forma de deficiência do nutriente (DEBJIT BHOWMIK, CHIRANJIB, 2010; HARDING; AGUAYO; WEBB, 2017; SZEREMENT *et al.*, 2022).

A deficiência de Zn está relacionada principalmente à carência natural dos solos cultivados, bem como, ao esgotamento de reservas do nutriente no solo devido à pouca reposição (ALLOWAY, 2008). Logo, como alternativa, a biofortificação agrônômica visa aumentar o Zn assimilável pelas planta, resultando no aumento dos teores em diferentes partes comestíveis, sejam raízes, folhas e grãos (BLAIR, 2013).

Os grãos são os principais alvos dos estudos relacionados à biofortificação por serem consumidos diariamente em todo o mundo, sendo componentes básicos para alimentação da população em geral. Dentre as culturas produtoras de grãos, o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das leguminosas mais produzidas e consumidas em todo mundo, sendo fundamental no consumo direto e diário da população (BROUGHTON et al., 2003; OLMEDILLA-ALONSO et al., 2013). As áreas de plantio e de produção de feijão no mundo vêm crescendo nos últimos anos, especialmente em países da Ásia, América Latina e África (FAO, 2018), justamente em regiões na qual a população até hoje apresenta problemas de deficiência de Zn (SKALNY; ASCHNER; TINKOV, 2021; WESSELLS; BROWN, 2012).

A melhoria da qualidade nutricional dos alimentos, como feijão, pode ser uma estratégia de grande importância para fornecer alimentos em quantidade que atendam as demandas nutricionais das populações. Além disso, a biofortificação com Zn pode beneficiar as plantas com a obtenção de maior produtividade em solos deficientes nesse nutriente (FAGERIA, 2000), também podendo melhorar outras características agrônomicas como a germinação e vigor de sementes e mudas (NATALE et al., 2004; OZTURK et al., 2006)

A biofortificação visa obtenção de alimentos enriquecidos capazes de auxiliar no combate as carências nutricionais da população. Entretanto, o processo de biofortificação agrônômica ainda carece de estudos que elevem sua eficiência. O uso de compostos orgânicos pode aumentar o aproveitamento dos nutrientes e auxiliar em seu acúmulo, favorecendo a biofortificação.

O ácido cítrico (AC) é um composto hidrossolúvel que pode atuar na formação de complexos orgânicos com Zn, proporcionando a melhor absorção e translocação pelas plantas (CHAIRIDCHAI; RITCHIE, 1993; NOGUEIRA et al., 2001; LEMOS et al., 2011; BADAMASI; DAGARI; SALE, 2020). No entanto, ainda existem lacunas quanto ao comportamento desses compostos e suas interações com os nutrientes nas plantas, bem como, seu papel na biofortificação. Logo, o uso de AC pode se tornar uma alternativa complementar, favorecendo o acúmulo de nutrientes em partes comestíveis e reduzindo a necessidade de insumos para alcançá-la.

Portanto, o presente estudo teve como objetivo avaliar nos grãos de feijão os efeitos de aplicações de Zn e AC sobre os teores de Zn, simultaneamente ao de proteínas e outros nutrientes, visando à biofortificação agrônômica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Produção de Alimentos

Há uma década, RASK e RASK (2011) observavam que o crescimento da população mundial, aliada à melhoria da renda das pessoas, estava aumentando a demanda de alimentos, pressionando o sistema de produção. Concomitantemente, FESS *et al.* (2011) mencionavam a importância dos avanços tecnológicos na agricultura para o aumento da produção agrícola buscando atender de forma sustentável à crescente demanda de alimentos. Mais recentemente, DWIVEDI *et al.* (2017) chamavam a atenção para o fato de que o foco produtivo para atender demandas quantitativas reteve os avanços por melhorias qualitativas e nutricionais dos alimentos. E comentavam que os avanços tecnológicos as práticas agrícolas na agricultura ganhavam espaço no que diz respeito à melhoria na oferta, disponibilização e variedade de alimentos, visando à nutrição adequada das populações.

Também há uma década, LEÃO e MALUF (2012) argumentavam que os sistemas de produção deveriam possibilitar o acesso a uma dieta não custosa, diversificada e equilibrada em termos nutricionais, composta por alimentos de qualidade e em quantidade adequadas, sendo estes os pilares fundamentais para promoção do direito humano à alimentação adequada, soberania e segurança alimentar e nutricional. No entanto, atualmente, SZEREMENT *et al.* (2021) afirmam que mesmo diante de grandes avanços, boa parte da população ainda carece de acesso a uma dieta balanceada e adequada em vitamina A e micronutrientes essenciais como Fe, Zn, Se e I, em quantidades capazes de atender suas exigências diárias.

2.2. Zinco na alimentação humana

O Zn é um elemento fundamental ao funcionamento dos ciclos biológicos de plantas e animais, sendo o segundo micronutriente de maior ocorrência nos tecidos orgânicos. A deficiência de Zn é um problema mundial de saúde pública, onde quase um terço da população já apresentava condições que predis põem à carência deste nutriente (HOTZ; BROWN, 2004). Esse quadro problemático ocorre tanto em países desenvolvidos como subdesenvolvidos, estando quase um quinto da população mundial já afetada por problemas decorrentes da insuficiência de Zn na alimentação (CESAR; WADA; BORGES, 2005; WELCH; GRAHAM, 2002).

O Zn desempenha diversas funções essenciais na saúde humana, compondo mais de 200 enzimas e diversos hormônios, atuando como regulador do sistema reprodutivo, imunológico, neurotransmissor, na sinalização intestinal, crescimento corporal, dentre outros. (DEBJIT *et al.*, 2010; WESSELS; RINK, 2020). As funções do Zn no corpo humano estão relacionadas à reprodução, regulação hormonal, divisão e diferenciação celular, reparo de tecidos e funcionamento das membranas celulares (HOTZ; BROWN, 2004; MAFRA; COZZOLINO, 2004). O Zn também é cofator de uma série de enzimas que auxiliam a atividade do sistema imunológico, na síntese de proteínas, na síntese de DNA, na regulação do pH celular e no metabolismo dos nutrientes (CASTRO-GUERRERO *et al.*, 2016; VIDYAVATI; SNEHA; KATTI, 2016). Além disso, sua atividade está relacionada a processos bioquímicos e fisiológicos envolvidos no crescimento, desenvolvimento e envelhecimento (FUKADA *et al.*, 2011).

Para suprir as demandas diárias de Zn são recomendadas doses de 11 mg dia⁻¹ para homens e 8 mg dia⁻¹ para mulheres adultas, no entanto, essa demanda diária tende a variar, sendo o Zn exigido em maior quantidade em algumas fases da vida, como infância, puberdade e gestação (HAMBIDGE *et al.*, 2008). As principais fontes alimentares de Zn são peixes, carnes bovinas, aves, nozes, amêndoas, castanhas, produtos lácteos, frutos do mar, cereais de grãos integrais, gérmen de trigo e feijões (VIDYAVATI; SNEHA; KATTI, 2016)

Em se tratando do Zn na dieta humana, ainda que a ingestão alimentar contenha as quantidades diárias demandadas do nutriente, isso não garante a

biodisponibilidade para o organismo humano. Pois, alguns compostos antinutricionais, como o fitato, presentes nos alimentos tendem a diminuir sua biodisponibilidade, sua absorção e utilização pelo organismo humano (PEREIRA; HESSEL, 2009). Além disso, o Zn no alimento tende a interagir com compostos, como, oxalato, fibras e outros minerais, o que prejudica severamente sua absorção (DOMENE; PEREIRA; ARRIVILLAGA, 2008).

A deficiência de Zn na dieta pode ocasionar uma série de doenças patológicas (CRUZ; SOARES, 2011). A deficiência desse nutriente na dieta, em função da ingestão inadequada, aliada à presença de compostos antinutricionais nos alimentos, distúrbios na absorção gastrointestinal, ou aumento na excreção urinária, podem ocasionar uma série de alterações no funcionamento do organismo (PRASAD, 2013). Os sintomas da deficiência de Zn podem se apresentar na forma de dermatites, imunidade suprimida, diarreia, dificuldades na cicatrização, quedas de cabelo, atraso no crescimento, hipogonadismo, doenças renais crônicas, hepáticas e distúrbios do neurodesenvolvimento (FUKADA *et al.*, 2011; YASUDA *et al.*, 2011, HOJYO *et al.*, 2014). Em gestantes, a deficiência de Zn também prejudica o desenvolvimento do feto, podendo levar a distúrbios no crescimento, má formação neural, prejuízos ao sistema imunológico fetal e em casos severos até abortos espontâneos (DA SILVA *et al.*, 2007). Logo, a deficiência deste nutriente afeta de maneira direta ou indireta o crescimento e desenvolvimentos normal, manutenção dos tecidos corporais, função sexual, visão e sistema imunológico, sendo vital para a sobrevivência, principalmente durante a infância, fase em que é mais requerido pelo corpo (HARVEST PLUS, 2018).

Assim, a deficiência de Zn é um problema de suma importância na saúde pública global, tendo em vista a limitação de acesso à alimentação com teor adequado desse nutriente em muitos países. E mesmo quando em teores adequados, quantitativamente, no alimento, a presença de componentes antinutricionais dificultam sua biodisponibilidade. Assim sendo, diante da grande importância fisiológica na manutenção de vários processos no organismo humano, trabalhos focados na biofortificação, e na elevação da qualidade nutricional dos alimentos, vem ganhando espaço (LOUREIRO *et al.*, 2018; JHA; WARKENTIN, 2020).

2.3. Zinco no solo e na planta

Nos solos, as concentrações de Zn geralmente variam de acordo com a sua classificação, rocha matriz e atuação de fatores de deposição e extração, apresentando valores médios entre 60 e 89 mg kg⁻¹ (BROADLEY *et al.*, 2007; KABATA-PENDIAS, 2010). Por se tratar de um micronutriente essencial às plantas, sua carência natural, junto às características intrínsecas de alguns solos, - representa grande limitação ao aumento de produtividade (FAGERIA, 2000). Os Latossolos predominantes no Brasil apresentam grandes limitações à produção agrícola, em especial, devido à carência de Zn, exigindo fertilizações para boas produções. No entanto, mesmo com uso de elevadas doses de fertilizantes, a disponibilização deste nutriente para as culturas pelo solo tende a ser baixa (MALAVOLTA, 2006).

O Zn é, predominantemente, absorvido pelas raízes como cátion Zn²⁺, podendo também ser absorvido como ZnOH, em condições de pH básico. Seu transporte a longa distância no xilema pode ser feito por meio da formação de ligantes com ácidos orgânicos ou na forma de cátion livre divalente. Este elemento é ainda classificado como parcialmente móvel no floema (MARSCHNER, 2012).

Nas plantas, o Zn apresenta grande importância biológica atuando na síntese de proteínas, clorofila e carboidratos, e nos processos metabólicos que envolvem sacarídeos, ácidos nucléicos e lipídios (TAIZ *et al.*, 2007; KABATA-PENDIAS, 2010). O Zn atua na síntese do triptofano (ALLOWAY, 2011), sendo precursor do ácido indolacético (AIA), auxiliando na produção do hormônio de crescimento auxina (BRENNAN, 2005). Além disso, possui papel catalítico e estrutural em diversas enzimas, como desidrogenase alcoólica, anidrase carbônica, proteinases e peptidases (WELCH; NORVELL, 1993), podendo também exercer funções no metabolismo do nitrogênio, e desintoxicação de radicais livres (MARSCHNER, 2012).

A deficiência severa de Zn pode ser verificada nas plantas pelo aparecimento de internódios curtos, estreitos, e em formatos de rosetas em seus meristemas apicais. As folhas novas apresentam formas enrugadas com aspecto lanceolado. Estes sintomas visuais tendem a ocorrer em virtude da desregulação de atividades hormonais, aliada a problemas metabólicos internos (SKOOG, 1940; MAŠEV; KUTÁČEK, 1966). Os processos de fotossíntese tornam-se comprometidos devido

aos danos nos cloroplastos, acarretando desarranjos no transporte eletrônico (ABBAS *et al.*, 2011). Essa deficiência pode vir a alterar a atividade da RNA-polimerase, provocando aumento na quantidade de aminoácidos, que junto à baixa atividade da enzima dismutase de superóxido provocam a perda da integridade das membranas e o aspecto enrugado das folhas (FURLANI, 2004).

Ainda que a deficiência de Zn resulte em baixas produções, bem como em baixa qualidade dos produtos agrícolas, em muitos casos, ocorre a ausência de sintomas visuais, sendo o fenômeno conhecido como fome oculta (ALLOWAY, 2009). Assim, a deficiência de Zn na cultura, bem como sua baixa acumulação nos tecidos, contribui não apenas para a redução da produtividade, mas também, para problemas sociais decorrentes da deficiência do nutriente. Visando elevar a produtividade e a qualidade nutricional do produto colhido, são necessárias práticas que estimulem o uso do Zn, incorporando-o junto às adubações (CAKMAK; HOFFLAND, 2012).

2.4. Biofortificação

A biofortificação é uma técnica que consiste em elevar os teores de micronutrientes nos alimentos, sendo importante principalmente em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Por meio de estratégias agrônomicas e genéticas é possível obter produtos agrícolas de maior qualidade nutricional capazes de mitigar problemas sociais relacionados a deficiência de micronutrientes que atingem grande parte da população (MANOS; WILKINSON, 2016; JHA; WARKENTIN, 2020). A biofortificação apresenta vantagens, como a obtenção de materiais genéticos de maior eficiência na absorção e acúmulo de micronutrientes, bem como disponibilizar alimentos com altos teores de micronutrientes a comunidades de baixa renda (NESTEL *et al.*, 2006).

A biofortificação agrônômica consiste no aumento dos teores de micronutrientes presentes nos produtos agrícolas por meio de modificações no meio produtivo e na disponibilização dos nutrientes através do manejo da adubação. Pode ser realizada por meio técnicas agrícolas que aumentem a disponibilidade dos nutrientes de interesse à cultura. Tais técnicas podem ser via adubação do solo,

aplicação foliar e tratamento de sementes (LOUREIRO *et al.*, 2018). Entretanto, a presença do nutriente no solo, não necessariamente corresponde à sua disponibilidade à cultura e sua alocação nos produtos agrícolas. Para que o resultado da biofortificação seja eficiente, o nutriente deverá ser absorvido pela planta e redistribuído pelos tecidos de modo que ocorra uma acumulação em suas partes comestíveis. Do mesmo modo, o nutriente deverá estar biodisponível após o preparo do alimento estando passível de ser absorvido pelo organismo (VALENÇA *et al.*, 2017).

A biofortificação genética é viabilizada por meio do melhoramento convencional de plantas ou através da engenharia genética. Ambas as estratégias têm como meta fornecer ao consumidor final produtos agrícolas de maior valor nutricional (SALTZMAN *et al.*, 2017). A engenharia genética é alternativa quando não há variabilidade nas características procuradas nas plantas disponíveis no banco de germoplasma da cultura, assim como, quando um micronutriente específico não existe naturalmente na cultura, e o melhoramento convencional não é possível (MAYER *et al.*, 2008; PÉREZ-MASSOT *et al.*, 2012).

A biofortificação tem sido uma ótima ferramenta para auxiliar no combate às carências nutricionais da população, visto que possibilita incorporar alimentos enriquecidos à dieta individual regular, suprindo, assim, as demandas do organismo para o seu funcionamento adequado (LOUREIRO *et al.*, 2018). Trabalhos visando à obtenção de alimentos com maior teor de Zn por meio da biofortificação vem sendo realizados para várias culturas (BOUIS; SALTZMAN, 2017; OZTURK *et al.*, 2006; KHAMPUANG *et al.*, 2020). Para isso, tem-se adotado técnicas de biofortificação por meio de cultivares geneticamente melhorados e métodos agrônômicos via adubações de solo e foliares (CAKMAK; KUTMAN, 2018).

2.5. O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

A cultura do feijão possui grande importância mundial, estando associada à alimentação de populações em todos os trópicos. Os grãos de feijão são fonte de proteínas, carboidratos, vitaminas, fibras e diversos elementos essenciais ao organismo humano. Os teores desses compostos tendem a variar de acordo com as condições de cultivo, fatores ambientais e a cultivar (SANTANA *et al.*, 2009).

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma planta dicotiledônea pertencente à família Fabaceae de porte herbáceo, com ciclo anual, cujos grãos são muito apreciados na culinária. A espécie é originária do continente americano, existindo registros de uso há pelo menos 8000 anos por populações que viviam nas Américas (EMBRAPA, 2000; FREITAS, 2006).

No Brasil, o feijão assume grande relevância no contexto social, cultural e econômico. A cultura do feijão pode se adaptar bem as condições edafoclimáticas locais, sendo cultivado por todo o país e assumindo papel de destaque entre as espécies mais cultivadas. O Brasil cultiva três safras durante um ano, sendo a primeira entre os meses de agosto a dezembro, a segunda de janeiro a abril e a terceira de março a junho. Logo, sua adaptabilidade, técnicas de manejo, e diversidade de variedades possibilitaram sua difusão pelo país, onde existem cultivos de norte a sul distribuídos ao longo do ano (SALVADOR, 2018).

Os sistemas de cultivo variam desde pequenos e médios produtores até sua produção comercial em sistemas tecnificados de larga escala. O cultivo do feijoeiro em pequenas escalas é comumente observado pelo país, onde a produção é convertida para consumo familiar e na geração de renda extra para as famílias. No Brasil, a cultura do feijão assume também um papel social, uma vez que é responsável pela geração de grande parte da mão de obra rural durante todo o processo de produção, o que torna a cultura importante na geração de emprego e renda (SILVA *et al.*, 2014). Do mesmo modo, também existem sistemas de cultivo em grandes escalas apresentando alto desempenho, devido ao uso de tecnologias de última geração, como adubação, uso de cultivares melhoradas e irrigação nos períodos de estiagem (SOUZA; FERREIRA, 2017).

O Brasil tem obtido posição de grande destaque em nível mundial, como um dos maiores produtores e consumidores de grãos de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (SALVADOR, 2018). Entretanto, a média nacional próxima dos 1000 kg ha⁻¹ (CONAB, 2021) ainda se encontra muito aquém de seu potencial, em grande parte devido às discrepâncias tecnológicas em seu sistema de cultivo. A baixa produtividade média do feijão no país está associada ao uso de sementes de baixa qualidade, manejo inadequado de pragas e de adubação, especialmente pelos pequenos e médios agricultores (ROCHA *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2014). Esses empecilhos enfrentados pela cadeia produtiva do feijão ainda são reflexos da falta de assistência técnica, que aliada a descapitalização dos pequenos produtores, dificultam a adoção de novas ferramentas que impulsionem sua produtividade (COÊLHO; XIMENES, 2020).

O sistema de produção do feijão necessita do uso de técnicas de adubação mais eficientes para aumentar a produtividade. Deste modo, a biofortificação agrônômica pode se tornar uma grande aliada, elevando a produtividade por meio do manejo eficiente da adubação, com a obtenção de produtos agrícolas de maior valor nutricional para atender às demandas de nutrientes da população. BARRAMEDA-MEDINA *et al.* (2017) pontuam que a biofortificação agrônômica, além de aumentar o teor de elementos essenciais, pode proporcionar aumento na produção de outros compostos nutricionais pelas plantas que resultem na melhoria da qualidade do produto. Assim, a biofortificação do feijão permite a obtenção de bons resultados na suplementação de Zn à população, principalmente na América do Sul e África, onde o grão é tradicionalmente consumido.

2.6. Ácido cítrico

O ácido cítrico (AC), ou ácido 2-hidroxi-1,2,3-propanotricarboxílico (C₆H₈O₇), é um ácido orgânico fraco de baixo peso molecular, sendo essencial aos organismos vivos, devido à sua ação em rotas metabólicas, como na respiração celular. No ciclo de Krebs ou ciclo do Ácido Cítrico, este composto atua fornecendo o citrato que permitirá o funcionamento do ciclo de reações subsequentes. O Ciclo de Krebs consiste em uma etapa da respiração celular em que a forma desprotonada do AC, o

citrato, é utilizado como fonte de carbono e energia para formação de compostos chave na obtenção energética celular como ATP e NADPH (POPOVA; PINHEIRO DE CARVALHO, 1998).

Nas plantas, o AC é fundamental ao metabolismo, auxiliando em algumas funções, como resistência à toxidez de alumínio (MA *et al.*, 2004; HU *et al.*, 2016), à deficiência de ferro (Fe) (SHLIZERMAN *et al.*, 2007), e na tolerância a metais pesados (LENSBOUER; DOYLE, 2010; WUANA; OKIEIMEN; IMBORVUNGU, 2010). Atua, também, na resistência à salinidade e a alcalinidade (SUN; HONG, 2011). Sua presença como AC, ou mesmo sua forma desprotonada como citrato, ocorre no citosol, na matriz mitocondrial ou em formas livres no interior da planta. Logo, o transporte de diversos íons e elementos metálicos, seja pelo xilema ou floema, pode estar associado à sua interação com o AC. Esse ácido desempenha também, um papel significativo no acúmulo de metais, como o Zn, estando associado à presença deste compostos nos vacúolos celulares em formas estáveis (RELLÁN-ÁLVAREZ *et al.*, 2010; XIE *et al.*, 2019).

Como estratégia adaptativa para maior absorção de nutrientes, as plantas liberam por meio das raízes compostos quelantes e ácidos orgânicos. Dentre estes ácidos, o AC tende a ser excretado em maior quantidade, sendo frequentemente detectado em altas concentrações na rizosfera. Sua interação com o solo auxilia de diversas formas na aquisição dos nutrientes, atuando de forma mais eficaz na mobilização de P inorgânico (KPOMBLEKOU; TABATABAI, 1993) e disponibilização do P presente em formas orgânicas (WEI; CHEN; XU, 2010). Este composto hidrossolúvel ainda pode atuar na formação de complexos com Zn, Fe e manganês (Mn) favorecendo sua difusão no solo e proporcionando a melhor aquisição pela planta (CHAIRIDCHAI; RITCHIE, 1993; NOGUEIRA *et al.*, 2001; LEMOS *et al.*, 2011; BADAMASI; DAGARI; SALE, 2020).

Diversos trabalhos tem sido relatado avaliando a eficácia da aplicação exógena do AC no solo, como alternativa de aumentar a eficiência de aquisição dos nutrientes, como exemplo, nas culturas do café e milho (NOGUEIRA *et al.*, 2001; LEMOS *et al.*, 2011; PIRI; SEPEHR; SANTOS *et al.*, 2017; RENGEL, 2019; TUSEI, 2019). Do mesmo modo, a aplicação foliar do AC pode vir agregar vantagens, fornecendo veículos que ao interagirem com tecidos foliares, facilitem a entrada e a translocação de compostos metálicos pela planta (JAAFARI; HADAVI, 2012; EIDYAN;

HADAVI; MOALEMI, 2014; EL-BELTAGI *et al.*, 2017; EL-YAZAL, 2019). Logo, sua aplicação via foliar junto ao Zn pode vir a se tornar uma alternativa para aumentar a absorção e a translocação desse nutriente dentro das plantas e acumular nas partes comestíveis, melhorando a qualidade nutricional dos alimentos.

2.7. Adubação foliar

As folhas são estruturas metabolicamente ativas complexas formadas por camadas que incluem a cutícula, a epiderme e o mesofilo foliar. As superfícies foliares são cobertas por cutículas hidrofóbicas que muitas vezes possuem ceras e células epidérmicas modificadas, como os tricomas. Logo abaixo, na epiderme celular além das células epidérmicas podem também ser encontradas células modificadas, como os estômatos, que possibilitam trocas gasosas com o ambiente. Nesta região mais superficial do tecido o grau de hidrofobicidade e polaridade da superfície da planta é determinado pela espécie, natureza química e topografia foliar, também sendo influenciadas pela estrutura das células epidérmicas (KANNAN, 1980). No interior destes órgãos, no mesofilo foliar, são realizadas etapas metabólicas, como a própria fotossíntese, essencial aos vegetais. Nestes tecidos foliares sua atividade metabólica requer um grande aporte de insumos nutricionais que podem ser suplementados via adubação foliar. Assim, a técnica de adubação foliar vem ganhando espaço nos cultivos agrícolas devido a seu potencial no fornecimento de nutrientes (NACHTIGALL; NAVA, 2010).

O requisito fundamental para a aplicação eficaz de um nutriente foliar é a penetração do ingrediente ativo na superfície da planta de modo a tornar-se metabolicamente ativo nas células-alvo, onde o nutriente é exigido. Para que exista a assimilação dos nutrientes aplicados, estes compostos devem ser adsorvidos pela folha, penetrar as camadas da cutícula, e em seguida serem absorvidos pelos compartimentos celulares metabolicamente ativos e, posteriormente podem ser translocados e utilizados pelas plantas (FRANKE, 1967). Importante ressaltar que a presença de rachaduras e fendas cuticulares ou a ocorrência de estruturas epidérmicas modificadas (estômatos e tricomas) podem contribuir de forma

significativa na taxa de absorção dos nutrientes aplicados via foliar (FERNÁNDEZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015).

Os nutrientes aplicados via foliar podem interagir ao terem contato com a superfície cuticular sendo sua penetração no tecido facilitada a depender da sua natureza polar. Compostos apolares lipofílicos podem adentrar os tecidos foliares seguindo modelos de dissolução e difusão ao interagirem com essa camada cuticular. Já sobre compostos hidrofílicos polares ainda restam questionamentos sobre a sua penetração na cutícula, sendo estes mecanismos ainda não totalmente compreendidos (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013). Do mesmo modo, a importância estomática no processo de entrada dos solutos ainda é questionável, devido a suas interações variarem de acordo a natureza polar do composto e as espécies químicas envolvidas, podendo este mecanismo ser relevante no processo de entrada nas folhas (BUKOVAC; WITWER, 1957; EICHERT *et al.*, 2008).

Os nutrientes ao adentrarem o tecido foliar podem ser absorvidos de forma passiva, por fluxos iônicos, ou mesmo ativa, por meio de processos metabólicos que consomem energia. Esses nutrientes ao terem contato com o interior celular podem ser realocados via floema ou mesmo xilema, sendo classificados em três grupos quanto sua mobilidade no floema: os altamente móveis (N, P, K, Mg, S, Cl, Ni), os intermediários ou condicionalmente móveis (Fe, Zn, Cu, B, Mo) e os pouco móveis (Ca, Mn) (EPSTEIN.; BLOOM, 2005).

Os nutrientes aplicados via foliar, podem ser diretamente assimilados pelas folhas auxiliando no processo de fotossíntese, estimulando o melhor desenvolvimento da planta e favorecendo seu desempenho produtivo. Deste modo, a adubação foliar pode vir a complementar a adubação em solo, tendo em vista sua rápida disponibilização dos nutrientes a planta, com boa uniformização pela área e podendo ser fornecida no momento de maior exigência pela cultura. Logo, os nutrientes exigidos em menores quantidades, ou que tenham baixa disponibilidade devido à sua interação com o solo, ou mesmo que são exigidos em grandes quantidades em estágios específicos da cultura, podem ser mais facilmente absorvidos quando disponibilizados via foliar. Desta forma, os micronutrientes podem ser aplicados com grande eficiência por meio da adubação via foliar, principalmente em sistemas focados em elevadas produtividades (NACHTIGALL; NAVA, 2010).

Portanto, na busca pela elevação dos teores dos nutrientes a biofortificação por meio de adubações via foliar se torna uma boa alternativa (ALSHAAL; EL-RAMADY, 2017). Deste modo, trabalhos como os de Cambraia *et al.* (2019) já reportam que o Zn aplicado via foliar transloucou para os grãos, elevando os teores passíveis de serem disponibilizados na dieta.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Design experimental

O experimento foi conduzido no período de maio a setembro de 2021, em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG. Os tratamentos foram esquematizados em um fatorial 4×4 , correspondentes a quatro doses de Zn (0, 10, 20 ou 30 kg ha⁻¹) e quatro doses de AC (0, 50, 100 ou 200 g ha⁻¹), em delineamento de blocos casualizados, com três repetições. A unidade experimental constituiu-se de um vaso contendo 5 dm³ de solo, com duas plantas. O solo utilizado no experimento foi um Latossolo Vermelho, coletado nas camadas de 20-40 cm, seco ao ar e passado em peneira de 2 mm de diâmetro, sendo realizada a caracterização química e física (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização química do Latossolo Vermelho utilizado, antes do experimento.

pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H +Al	SB	t	T	V	m
H ₂ O	mg dm ⁻³		----- cmol _c dm ⁻³ -----							-----%	
5,25	0,3	6,0	0,58	0,04	1,26	7,7	0,64	1,9	8,34	7,7	66,3
MO		P-Rem	S	B	Cu	Mn		Fe	Zn		
g kg ⁻¹		mg L ⁻¹	----- mg dm ⁻³ -----								
33,6		8,7	0,6	0,02	0,67	13,6		26,1	0,33		
Areia grossa		Areia fina	----- kg kg ⁻¹ -----				Silte		Argila		
0,8		0,3					0,8		0,81		

pH em H₂O, relação 1:2,5; pH em KCl 1,0 mol L⁻¹, relação 1:2,5; P, K, Cu, Mn, Fe e Zn (extrator Mehlich-1); Ca²⁺ e Mg²⁺ (extrator KCl 1,0 mol L⁻¹); Matéria orgânica (Walkley e Black); Fósforo remanescente (extrator Mehlich-1); Al³⁺ = acidez trocável (extrator KCl 1,0 mol L⁻¹); H+Al = acidez potencial (extrator Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹); SB = soma de bases (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺); t = capacidade efetiva de troca de cátion (t = SB + Al³⁺); T = capacidade de troca de cátions (CTC pH 7 = T = SB = (H+Al)); V = saturação por bases (V = 100 SB T⁻¹) e m = saturação por alumínio (m = 100 Al³⁺ t⁻¹).

De acordo com os resultados obtidos na análise química do solo foram feitos os procedimentos de cálculo e recomendação da calagem e adubação. A calagem foi efetuada seguindo método de neutralização do Al³⁺ e elevação dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ para correção da acidez do solo (ALVAREZ *et al.*, 1999), utilizando para isso o CaCO₃ e o MgCO₃ (P.A.) com proporções de 4:1 permanecendo o solo em incubação durante 30 dias. A adubação foi realizada seguindo as recomendações de NOVAIS (1991), sendo aplicadas doses (mg kg⁻¹) de 100 de N, 150 de K, 40 de S, 081 de B, 1,33 de Cu, 3,66 de Mn, 0,15 de Mo, 1,55 de Fe e 4 de Zn. Todo o P foi incorporado durante o plantio e os outros nutrientes parcelados em 3 vezes, sendo fornecidos aos 15, 30 e 45 d após emergência.

Foram semeadas, em cada vaso, 6 sementes de feijão da cultivar BRSMG Madrepérola (CARNEIRO *et al.*, 2012). Aos sete dias pós-emergência as plântulas foram desbastadas, mantendo-se duas plantas por vaso. O solo foi irrigado diariamente com água deionizada mantendo-se a umidade em cerca de 80 % da capacidade de campo.

As doses de Zn e AC foram aplicadas via foliar no início do estágio R8 (enchimento das vagens) de modo a atingir toda a área foliar das plantas, sem que ocorresse escorrimento. O Zn utilizado teve como fonte o ZnSO₄.7H₂O, com 23 % de

Zn. Já o AC teve como fonte o produto padrão da marca Fmaia utilizado como reagente analítico laboratorial com 99,99 % de AC anidro. As aplicações das soluções de Zn e AC foram realizadas com auxílio de um spray manual com o bico de pulverização tipo leque, com uma pressão de 60 ibf pol⁻².

3.2. Análises em plantas

Ao final do ciclo (estágio R9) as plantas foram colhidas e obtidos, número de vagens por planta (NV), número de grãos por vagem (NGV), por planta e a massa de 100 grãos (PCG). Para determinar a massa da matéria seca, os grãos colhidos foram secados em estufa com circulação forçada de ar a 105 °C, até atingir o peso constante (MAPA, 2009). Após os grãos serem retirados da estufa os valores correspondentes a produção de massa de grãos por planta e PCG foram calculados, sendo corrigidos para 14 % de umidade. A produtividade de grãos (kg/ha) foi obtida considerando uma população de 250.000 plantas ha⁻¹.

Os grãos secos foram moídos em moinho tipo Willey com peneira de 20 *mesh* e, posteriormente, foram determinados os teores de macro e micronutrientes. Os teores de S, Cu, Fe, Mn e Zn foram determinados após digestão nitro-perclórica, sendo a dosagem no extrato avaliada por meio da espectrofotometria de emissão ótica acoplado ao plasma induzido (ICP-OES).

A determinação dos teores de N-total foi realizada por meio da digestão sulfúrica de acordo com o método Kjeldahl. Com os teores de N-total, foram obtidos também os teores de proteína total dos grãos (%), estimados por meio do fator 6,25 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). De acordo equação:

$$\textit{Proteína total} = 6,25 \times N - \textit{total}$$

3.3. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise dos pressupostos da estatística paramétrica pelo teste Shapiro-Wilk para normalidade dos dados. Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) ao nível de 5 % e 10 % de probabilidade, aplicando o teste F. As interações significativas entre os tratamentos foram desdobradas, e a partir destas foram elaborados modelos considerando a significância da interação. As análises foram realizadas com o auxílio do programa Sisvar (FERREIRA, 2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produção de grãos e seus componentes

O efeito da aplicação foliar de Zn e AC no estágio R8 das plantas de feijão, quanto à resposta das variáveis referentes a produção de grãos, não foi significativo ($p < 0,05$). Assim foram obtidos valores da média de número de grãos por planta igual a 61, número de vagens por planta (NVP) igual a 12, número de grãos por vagem (NGV) igual a 4,9, produção de massa de grãos igual a 15,5 g, e peso de cem grãos (PCG) igual a 25,2 g.

A aplicação de doses foliares, de Zn pode resultar em ganhos produtivos no número de vagens, número de grãos, e peso de cem grãos, desde que seja observada a época de aplicação, forma de aplicação e fonte (MAHDIEH *et al.*, 2018; NADERGOLI; YARNIA; KHOEI, 2011). Entretanto, a aplicação foliar dos tratamentos com Zn e AC no estágio R8 da cultura não promoveram aumento na produção.

As condições de cultivo, nutrição e manejo permitiram que as unidades experimentais expressassem seu potencial produtivo bem acima do esperado a campo (ABREU *et al.*, 2011). A aplicação de Zn e Ac via foliar, proporcionou produção estimada de cerca de 3.700 kg ha⁻¹.

O resultado obtido com os tratamentos ocorreu devido à aplicação em estágio de desenvolvimento (R8) em que as plantas apresentavam as vagens já formadas,

tendo, assim, atingido seu potencial produtivo definitivo. Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por Bresson et al. (2018) em que a pulverização de doses foliares de Zn em estágio reprodutivo não impactaram na massa de cem grãos, no número de vagens por planta nem na produtividade de grãos.

A aplicação de micronutrientes foliares é eficaz no fornecimento de nutrientes a planta e no combate a estresses abióticos, no entanto o excesso desses micronutrientes pode levar a distúrbios no crescimento e fitotoxidez (PASALA *et al.*, 2022). Vale ressaltar que durante o experimento foram aplicadas doses foliares de Zn bem acima do recomendado, e as plantas que receberam as doses mais elevadas nos tratamentos com Zn e AC (100, 200 g ha⁻¹ AC e 20, 30 kg ha⁻¹ Zn) apresentaram alguns sintomas de fitotoxidez nas folhas, como manchas arroxeadas (Figura 1). No entanto, essas plantas não apresentaram redução na produção e seus componentes. Isto provavelmente se deve à aplicação tardia (estágio R8) do Zn e do AC, momento em que as plantas já se encontravam com a grãos formados e produção definida.

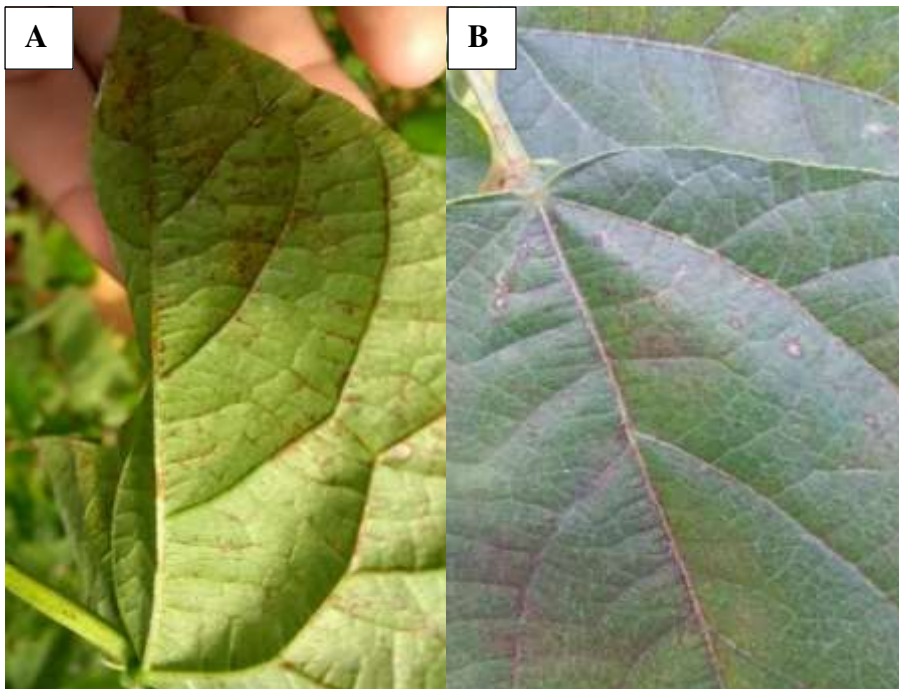


Figura 1. Folhas de feijoeiro 5 dias após aplicação de tratamentos. Presença de manchas arroxeadas e pequenas necroses abaxiais (A) e adaxiais (B).

4.2. Zn nos grãos

A aplicação das doses de Zn e AC influenciaram nos teores de Zn nos grãos de feijão (Tabela 2). Cambraia et al. (2019) relatam que a aplicação foliar de doses de Zn visando à biofortificação com Zn no estágio R8 da cultivar Madrepérola pode elevar os teores de Zn no grãos atingindo 67,5 mg kg⁻¹. Do mesmo modo, vários trabalhos relatam que a aplicação de AC favorece o acúmulo de nutrientes, como o Zn, em plantas e em grãos (TALEBI *et al.* 2014; HU *et al.*, 2016; ALLAHVERAN *et al.*, 2018; EL-YAZAL, 2019; MANDOUR *et al.*, 2019;)

Tabela 2. Análise de variância (ANOVA) para o teor de zinco presente nos grãos em função dos tratamentos de Zn e AC aplicados via foliar no feijoeiro.

Fator	GL	Zn
		Valor F
Bloco	2	33,362 **
Zn	3	268,519 **
AC	3	4,676 **
Zn x AC	9	1,930 *
Resíduo	30	
CV (%)		6,28

** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade.

A interação entre as doses de Zn e de AC aplicadas nas folhas do feijoeiro no estágio R8 da cultura apresentou efeitos significativos (Tabela 2). Com a aplicação das doses de 24 kg ha⁻¹ de Zn e 132,4 g ha⁻¹ de AC houve aumento de 35 para 79,6 mg kg⁻¹ no teor de Zn nos grãos (Figura 2). A superfície de resposta do teor de Zn nos grãos em função da dose de Zn e dose de AC aplicadas via foliar (Figura 2) mostra que na faixa entre 17 e 30 kg ha⁻¹ de Zn aplicado houve proximidade dos valores de Zn nos grãos. Similarmente, os valores acima de 30 g ha⁻¹ de AC promoveram incrementos semelhantes de Zn nos grãos.

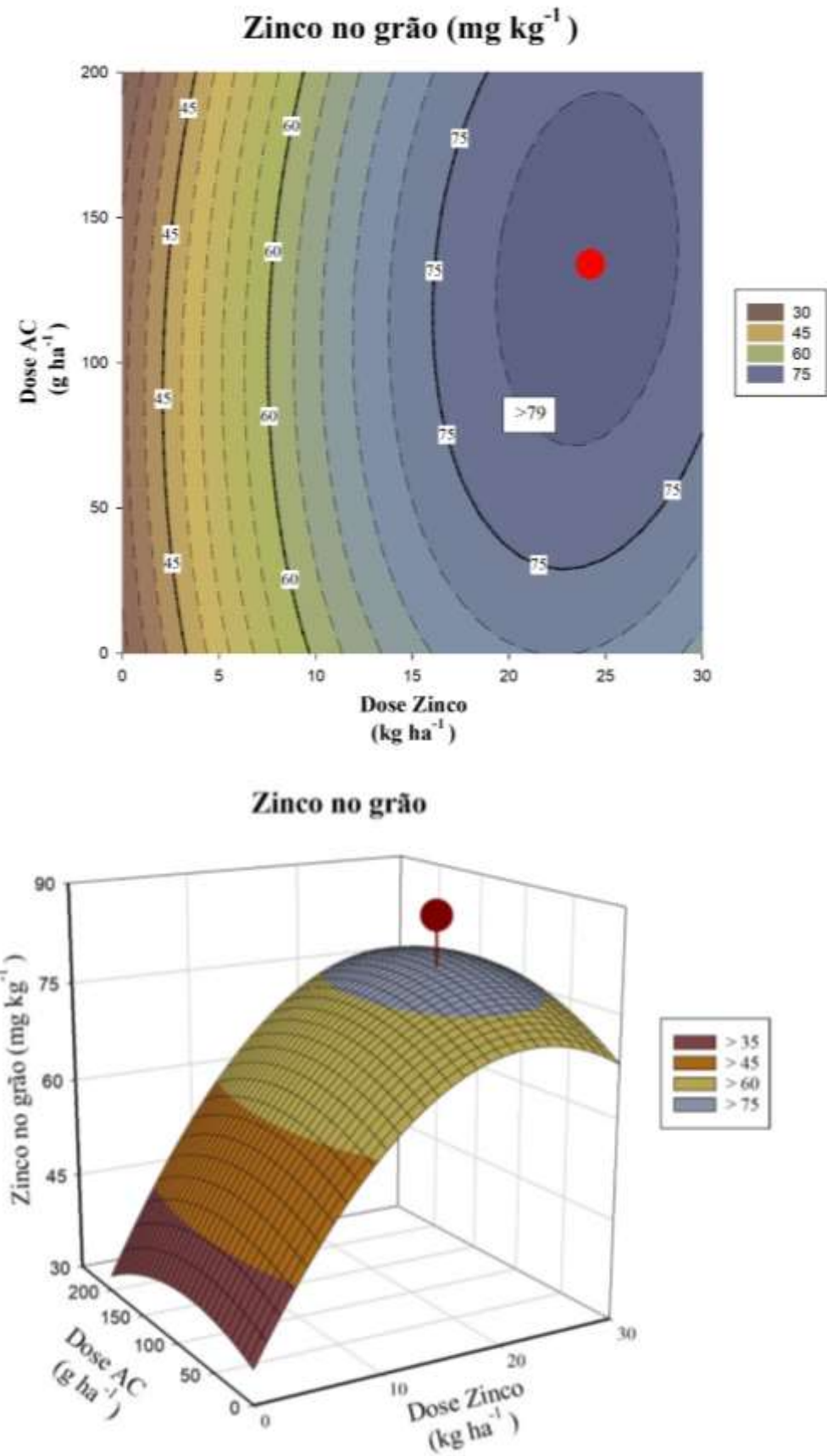


Figura 2. Superfície de resposta para os teores de Zn nos grãos em função da aplicação de Zn e AC via foliar no feijoeiro. O marcador indica ponto de dose de

máxima eficiência no acúmulo de Zn pelos grãos (Zn = 24; AC = 132,4). O zinco nos grãos: $Z = 34,9672882 + 3,3026211^{**} Zn - 0,0734695^{**} Zn^2 + 0,0744792^{**} AC - 0,0004399^{**} AC^2 + 0,0017459^{**} Zn: AC$ ($R^2 = 0,87$). ****** Significativo a 5 % de probabilidade; ***** significativo a 10 % de probabilidade.

O Zn acumulado nos grãos pode ser elevado de 35 mg para cerca de 75 mg de Zn já com doses próximas de 17 kg ha⁻¹ de Zn e 30 g ha⁻¹ AC. Deste modo, os resultados sugerem que já com uso de doses menores as plantas de feijoeiro apresentaram aumentos significativos nos teores de Zn nos grãos. Sendo assim, a aplicação conjunta de doses de AC e Zn podem favorecer a translocação e acúmulo de Zn nos grãos. Resultado similar em plantas de uvas (*Vitis vinífera*) e milho (*Zea mays*) foi observado, onde ocorrem ganhos qualitativos no acúmulo de Zn (EL-YAZAL, 2019; MOHAMED, 2018).

A aplicação conjunta de Zn e AC, proporcionou melhoria no teor de Zn nos grãos de feijão, indicando um possível sinergismo entre a aplicação de Zn e a aplicação de AC nas folhas. Na planta, o AC assume importante papel como ligante que favorece a translocação do Zn, aumentando sua mobilidade e reduzindo os efeitos danosos de seu excesso no meio intracelular. Isso permite que a planta acumule compostos em formas menos tóxicas e tenha maior capacidade de resistir a estresses abióticos provocados pelo excesso de metais (ZAHAN *et al.*, 2021).

4.3. Proteína nos grãos

As proteínas são moléculas poliméricas, baseadas em junções de aminoácidos, compostos nitrogenados orgânicos, e complexos formados fundamentalmente por C, H, O e N (BROUGHTON *et al.*, 2003). Os grãos de feijão constituem alimento básico para fornecimento de minerais, vitaminas, energia e proteína às populações. Os resultados obtidos no experimento indicam que o Zn aplicado via foliar no feijão, bem como a aplicação de Zn com AC podem influenciar nos teores de proteína nos grãos (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância (ANOVA) para o teor de proteína presente nos grãos em função dos tratamentos de Zn e AC aplicados via foliar no feijoeiro.

Fator	GL	Proteína nos grãos
		Valor F
Bloco	2	14,7927**
Zn	3	24,4894 **
AC	3	1,7152 ^{Ns}
Zn x AC	9	3,5240 **
Resíduo	30	
CV (%)		4,46

** Significativo a 5 % de probabilidade; ^{Ns} não significativo.

O desdobramento da interação Zn e AC (Tabela 3) resultou no modelo de superfície de resposta para o teor de proteína nos grãos em função da dose de Zn e dose de AC aplicadas via foliar (Figura 3). As doses 16,27 kg ha⁻¹ de Zn e 88,92 g ha⁻¹ de AC promoveram maior acúmulo de proteína nos grãos de feijão. Essas doses, proporcionaram um acréscimo de 13,70 % no teor de proteína, elevando os teores de proteína nos grãos de 19,75 nos tratamentos controle, para cerca de 22,45% nos tratamentos com Zn e AC.

Considerando, a aplicação das doses de 24,0 de Zn e 132,4 de AC, que juntas corresponderam ao máximo teor de Zn nos grãos, o teor de proteína nos grãos também aumentou. Nestas doses os teores de proteína nos grãos passaram de 19,75 nos tratamentos controle para cerca de 21,72 % nas doses de Zn e AC de máxima eficiência na biofortificação com Zn, uma elevação de 10,0 % nos teores.

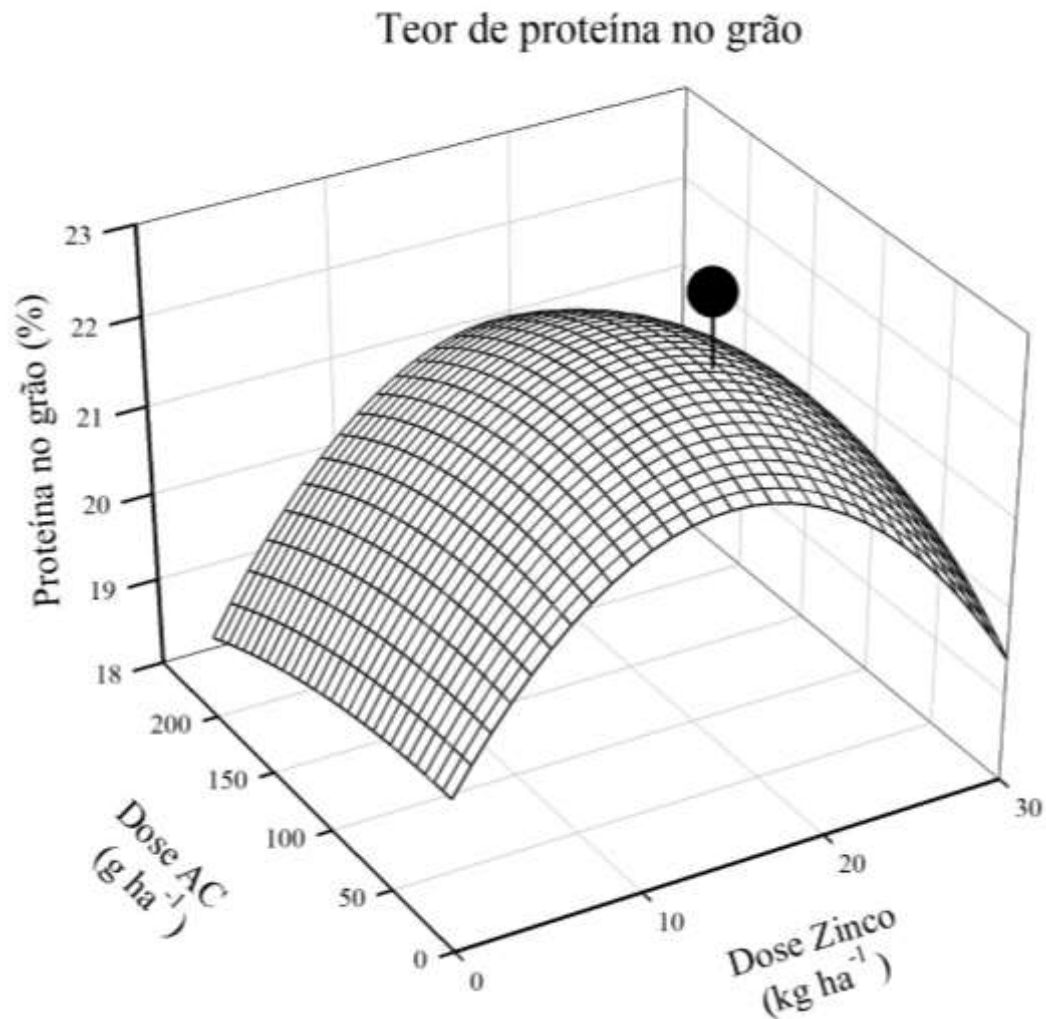


Figura 3. Superfície de resposta para os teores de proteína nos grãos em função da aplicação de Zn e AC via foliar no feijoeiro. O marcador indica ponto de dose de máxima eficiência no acúmulo de Zn pelos grãos ([Zn = 24 kg ha⁻¹], [AC = 132,4 g ha⁻¹]). A proteína média nos grãos: $Z = 19,7506579 + 0,3110265^{**} Zn - 0,0107457^{**} Zn^2 - 0,0000203^{**} AC^2 + 0,0006489^{**} Zn:AC - 0,0000024^{*} Zn:AC^2$ ($R^2 = 0,64$).

** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade.

O teor de proteína presente nos grãos é influenciado por ações de manejo que interfiram nas interações entre genótipo x ambiente. Deste modo a cultivar escolhida, bem como o manejo de irrigação, adubação e fatores estressantes podem vir a interferir na composição e valor nutricional dos grãos (KIGEL, 1999).

Houve interação entre os efeitos do Zn e AC, promovendo aumento do teor de proteína nos grãos (Figura 3). Os grãos de feijão normalmente apresentam teores de proteína que variam entre 20,35 a 27,24 % (DE TOLEDO *et al.*, 2008), dependendo

dos tratos culturais e da cultivar foram encontrados valores entre 16 e 25 % em 40 genótipos cultivados pelo Brasil (FIDELIS *et al.*, 2019).

Na literatura, é relatado que a aplicação de Zn também apresenta efeitos positivos sobre o teor e conteúdo de proteína presentes nos grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)(KAZEMI POS *et al.*, 2008). Kazemi Pos *et al.* (2008) relatam como o uso do Zn no solo, foliar e até no tratamento de sementes, podem interferir no teor de Zn e proteína, bem como de Cu, Mn e Fe nos grãos, neste caso, a aplicação foliar de Zn foi o principal responsável pela elevação de Zn e Fe no grão. Em outras culturas, também já se tem relatos da aplicação Zn em estágio reprodutivos resultando na elevação dos teores de proteína e Zn nos grãos. Em milho (*Zea mays*) as aplicações de Zn foliar, via sulfato de zinco, apresentaram efeitos elevando os teores de proteína nos grãos (SHEKARI *et al.*, 2015). Do mesmo modo, Soltoni (2020) relatou em Arroz (*Oryza sativa*) que a aplicação de sulfato de zinco no estágio reprodutivo foi capaz de elevar em mais 30 % o teor de proteína nos grãos quando comparado ao controle.

A aplicações de doses foliares de AC se correlacionam ao aumento dos teores de clorofila e atividade proteolítica dos tecidos foliares, interferindo no conteúdo de nitrogênio potencialmente acumulado pelos grãos, sugerindo uma possível ação indireta do AC aplicado nas folhas, no conteúdo de proteína dos grãos (MARTINEZ-PACHECO *et al.*, 2011; DARANDEH; HADAVI, 2012;). Os efeitos encontrados da interação entre AC e Zn sobre o teor de proteína dos grãos corroboram com o esperado da adição exógena de AC como transportador de Zn, bem como seu papel no fornecimento de compostos carbônicos e energia usados no ciclo respiratório e processos bioquímicos de anabolismo e catabolismo, que em conjunto ao Zn assumem papéis metabólicos na síntese e atividade proteica (BROADLEY *et al.*, 2007).

4.4. Efeito de doses de Zn e AC sobre outros nutrientes nos grãos.

Os tratamentos com Zn e AC também resultaram em efeitos sob os teores de outros nutrientes nos grãos (Tabela 4). A interação entre Zn x AC resultou em alterações dos teores de Cu, Fe, Mn e S presentes nos grãos.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para os teores Cu, Fe, Mn e S presentes nos grãos de doses de Zn e AC aplicados via foliar no feijoeiro.

Fator	GL	Cu	Fe	Mn	S
		Valor F			
Bloco	2	26,8250**	20,4054**	44,805**	28,656**
Zn	3	2,1359 ^{Ns}	10,2203**	7,408**	29,266**
AC	3	10,4468**	14,4871**	6,392**	118,763**
Zn x AC	9	3,4434**	2,7175**	5,053**	2,99**
Resíduo	30				
CV (%)		8,59	11,45	7,81	4,06

** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade; ^{Ns} não significativo.

As doses de 24 kg ha⁻¹ Zn e 132,4 g ha⁻¹ AC, que associadas correspondem ao ponto de máxima elevação dos teores de Zn nos grãos (Figura 3), também alteraram os teores de outros nutrientes (Tabela 4). A interação entre Zn x AC na dose de máximo teor de Zn no grão ([Zn = 24], [AC = 132,4]), elevaram os teores de Cu, Fe, Mn e S quando comparados aos teores presentes no tratamento controle, sem aplicação de Zn e AC.

A aplicação via foliar das doses 21,97 kg ha⁻¹ de Zn e 200 g ha⁻¹ de AC, proporcionaram o maior teor de S nos grãos, cerca de 3,00 g kg⁻¹ (Figura 4). No ponto correspondente ao valor máximo de biofortificação com Zn ([Zn = 24], [AC = 132,4]) os teores de S nos grãos também elevaram, passando de 1,98 g kg⁻¹ (na dose de [Zn = 0], [AC = 0]) para 2,88 mg kg⁻¹. Isso corresponde ao aumento de 45,75 % no teor de S presente nos grãos utilizando a dose de máxima biofortificação com Zn.

O S desempenha papel importante no metabolismo das plantas, em especial de proteínas e na composição dos aminoácidos cisteína e metionina. Na planta, sulfato pode ser convertido em cisteína, no qual quando translocados via floema atua no transporte de metais, ou mesmo, pode ser convertida em metionina ou incorporada em glutatona, podendo exercer funções no transporte de aminoácidos ou como matéria prima de proteínas (HAWKESFORD e DE KOK, 2006). Em plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) o S compõem elemento chave no transporte e acúmulo de proteínas nos grãos (PANDURANGAN *et al.*, 2015). No ponto de máxima biofortificação com Zn ([Zn = 24], [AC = 132,4]) a elevação dos teores de S nos grãos (Figura 4) corrobora com os resultados obtidos de proteína nos grãos (Figura 3).

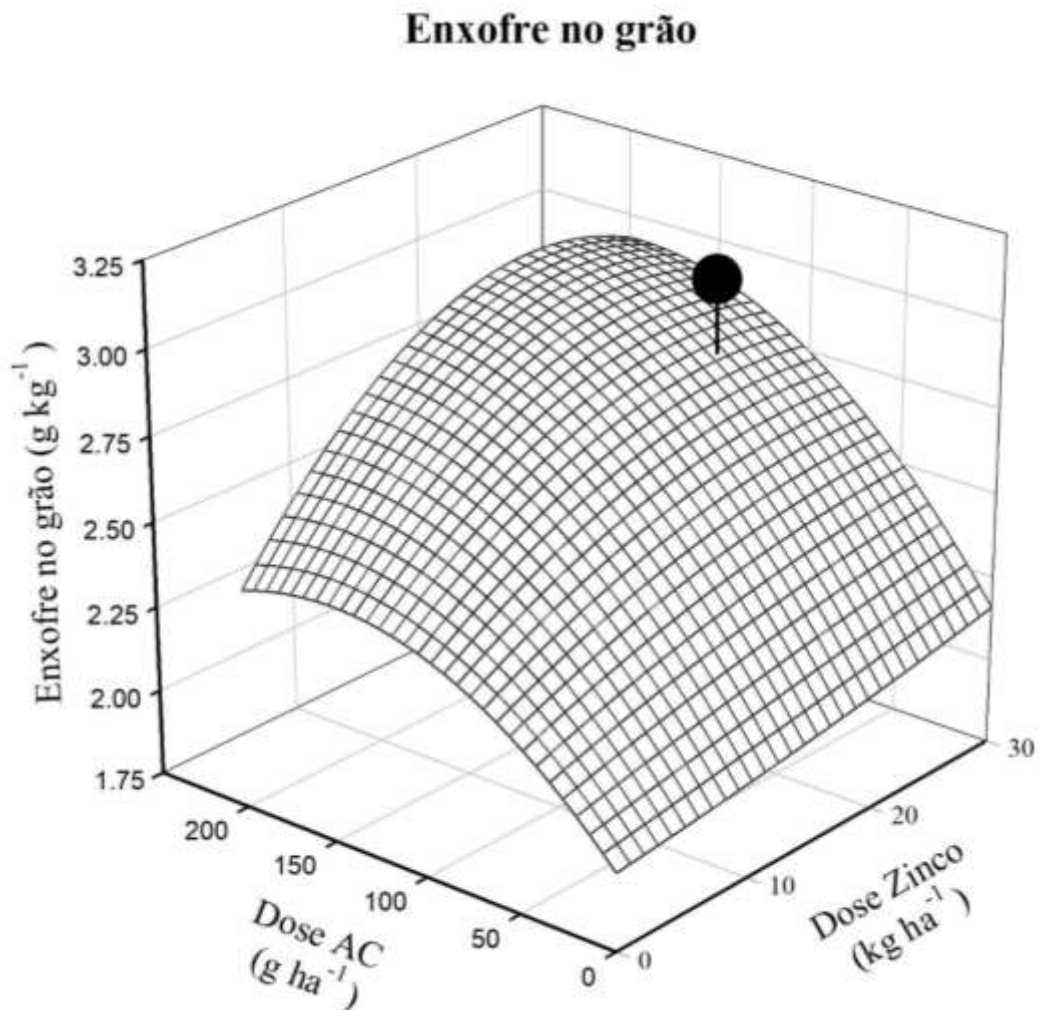


Figura 4. Superfície de resposta para os teores de enxofre nos grãos em função da aplicação de Zn e AC via foliar no feijoeiro. O marcador indica ponto de dose de

máxima eficiência no acúmulo de Zn pelos grãos ($[Zn = 24 \text{ kg ha}^{-1}]$, $[AC = 132,4 \text{ g ha}^{-1}]$). O enxofre nos grãos: $Z = ([1,978310397 + 0,0041405717 \text{ Zn} + 0,0000618205 \text{ Zn}^2 + 0,006127087^{**} \text{ AC} - 0,0000202565^{**} \text{ AC}^2 + 0,0002570557^{**} \text{ Zn:AC} - 0,0000065846^{**} \text{ Zn}^2:\text{AC}])$ ($R^2 = 0,83$). ****** Significativo a 5 % de probabilidade; ***** significativo a 10 % de probabilidade.

Para o Fe a aplicação via foliar das doses $17,35 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn e $92,49 \text{ g ha}^{-1}$ de AC, proporcionou o maior teor nos grãos, cerca de $96,80 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 5). No ponto correspondente ao valor máximo de biofortificação com Zn ($[Zn = 24]$, $[AC = 132,4]$) os teores de Fe nos grãos também elevaram, passando de $75,56 \text{ mg kg}^{-1}$ (na dose de $[Zn = 0]$, $[AC = 0]$) para $89,87 \text{ mg kg}^{-1}$. Isso corresponde ao aumento de 18,9 % no teor de Fe presente nos grãos utilizando a dose de máxima biofortificação com Zn.

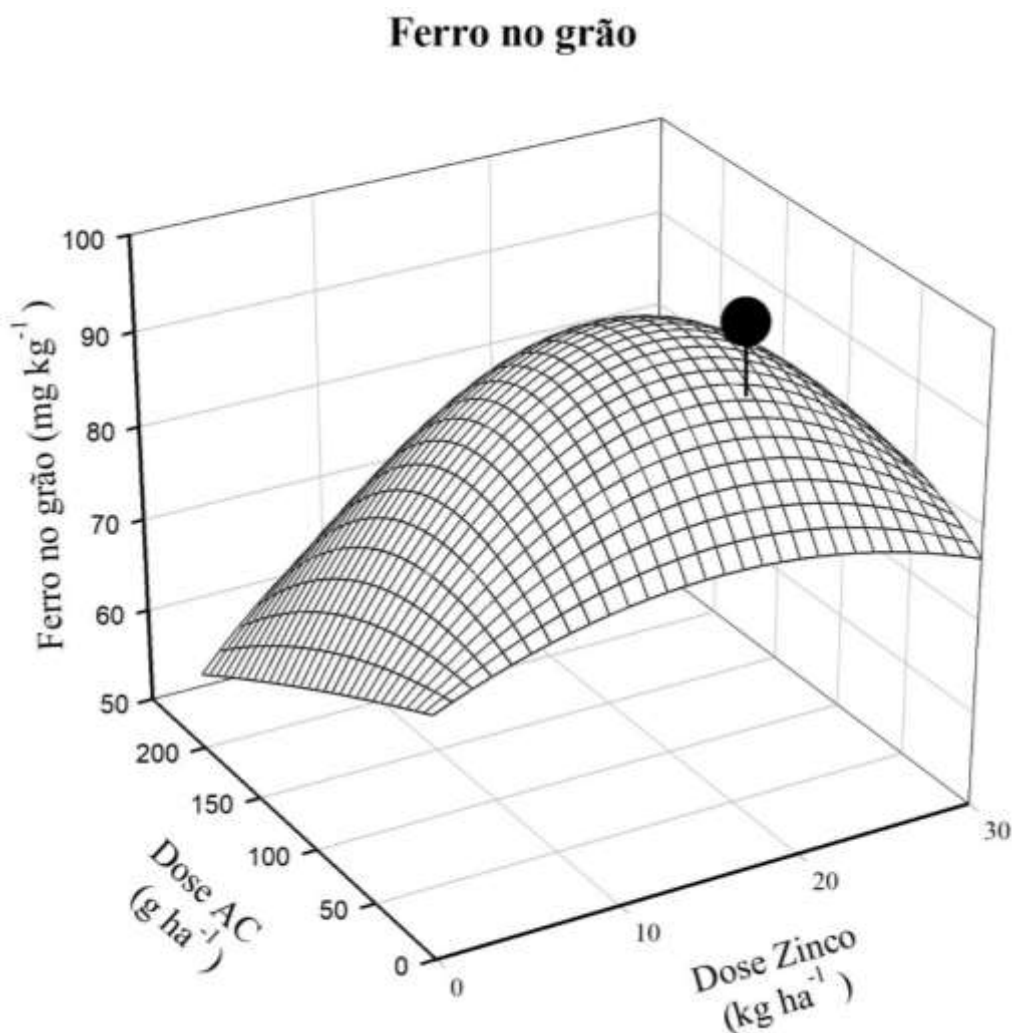


Figura 5. Superfície de resposta para os teores de ferro nos grãos em função da aplicação de Zn e AC via foliar no feijoeiro. O marcador indica ponto de dose de máxima eficiência no acúmulo de Zn pelos grãos ([Zn = 24 kg ha⁻¹], [AC = 132,4 g ha⁻¹]). O Fe nos grãos: $Z = 75,5672825 + 0,8208423 \text{ Zn} - 0,0263537 \text{ Zn}^2 - 0,0772335 \text{ AC} - 0,0000489 \text{ AC}^2 + 0,0447015^{**} \text{ Zn:AC} - 0,0012481^{**} \text{ Zn}^2:\text{AC} - 0,0001914^{**} \text{ Zn:AC}^2 + 0,0000054^{**} \text{ Zn}^2:\text{AC}^2$ ($R^2 = 0,60$). ** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade.

De acordo à Figura 5 as doses de AC também apresentaram efeitos significativos sobre os teores de Fe nos grãos. O Fe e o Zn são translocados via xilema, podendo estar associados a ácidos orgânicos. Assim, o complexo de citrato com o Fe atua como importante agente na distribuição de Fe a longas distâncias na planta (RELLÁN-ÁLVAREZ *et al.*, 2010). Desta forma, a presença do ácido cítrico pode ocasionar o aumento no acúmulo de Fe devido a sua maior translocação pela planta (AMRI; SHAHSAVAR, 2015)

Do mesmo modo, a aplicação das doses de 24 kg ha⁻¹ de Zn e 132,4 g ha⁻¹ de AC também aumentaram os teores de Cu nos grãos. Nestas doses os grãos de feijoeiro passaram de 3,38 mg kg⁻¹ (dose de [Zn = 0], [AC = 0]), para 4,14 mg kg⁻¹ uma elevação de 22,84 % nos teores deste elemento nos grãos. A aplicação via foliar das doses 19,83 kg ha⁻¹ de Zn e 199,75 mg ha⁻¹ de AC, proporcionaram os maiores teores de Cu, cerca de 4,17 mg kg⁻¹ (Figura 6).

Cobre no grão

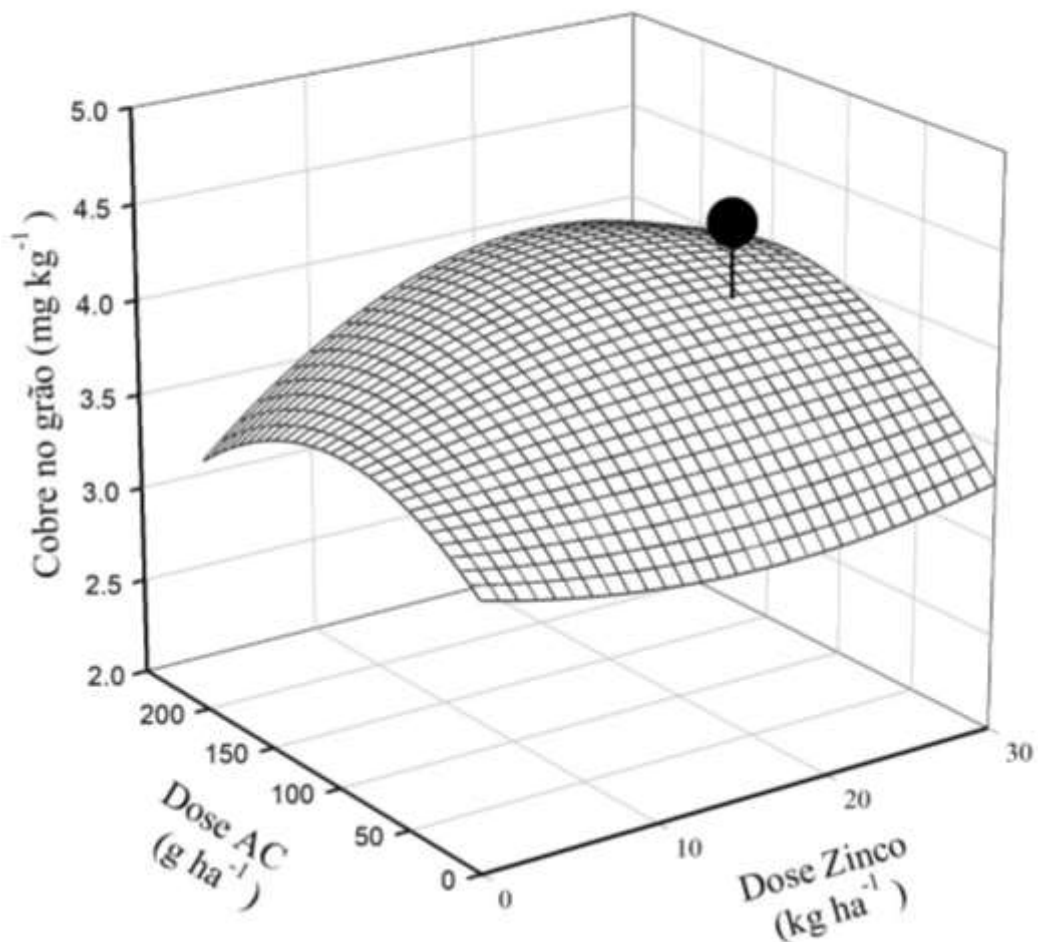


Figura 6. Superfície de resposta para os teores de cobre nos grãos em função da aplicação de Zn e AC via foliar no feijoeiro. O marcador indica ponto de dose de máxima eficiência no acúmulo de Zn pelos grãos ([Zn = 24 kg ha⁻¹], [AC = 132,4 g ha⁻¹]). O Cu nos grãos: $Z = 3,3781869 - 0,0247491 \text{ Zn} + 0,0007417^* \text{ Zn}^2 + 0,0071021^{**} \text{ AC} - 0,0000368^{**} \text{ AC}^2 + 0,0005479^{**} \text{ Zn:AC} - 0,0000144^* \text{ Zn}^2:\text{AC}$ ($R^2 = 0,50$). ** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade.

Os teores de Mn também aumentaram com aplicações de Zn e AC. A aplicação via foliar das doses 14,86 kg ha⁻¹ de Zn e 130,95 g ha⁻¹ de AC, proporcionaram os maiores teores de Mn, correspondendo a 19,67 mg kg⁻¹ (Figura 7). Já nas doses de máxima biofortificação com Zn ([Zn = 24], [AC = 132,4]) os teores de Mn nos grãos também aumentaram de 15,75 mg kg⁻¹ para 18,70 mg kg⁻¹ uma elevação de 19,1 % nos teores deste elemento nos grãos.

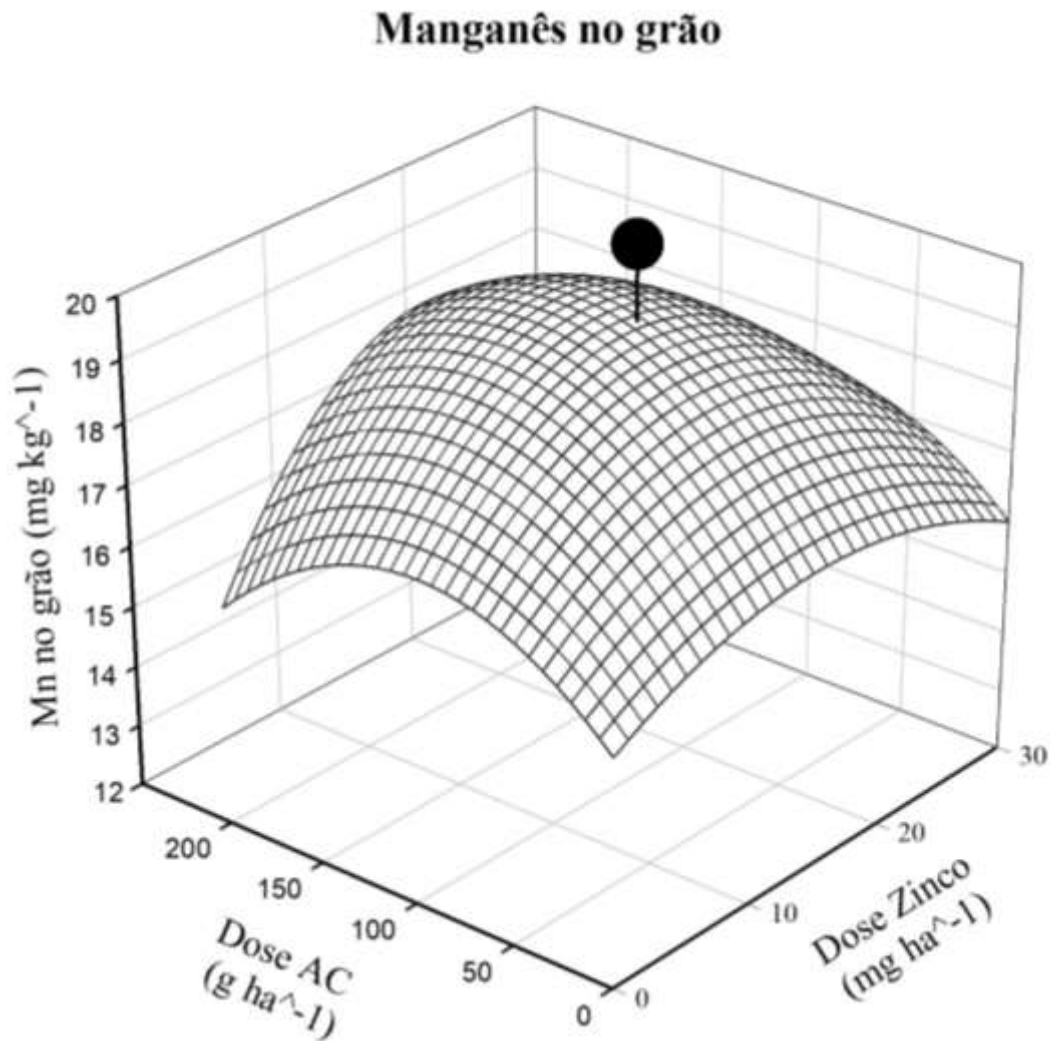


Figura 7. Superfície de resposta para os teores de manganês nos grãos em função da aplicação de Zn e AC via foliar no feijoeiro. O marcador indica ponto de dose de máxima eficiência no acúmulo de Zn pelos grãos ($[Zn = 24 \text{ kg ha}^{-1}]$, $[AC = 132,4 \text{ g ha}^{-1}]$). O Mn nos grãos: $Z = 15,7477698 + 0,1434873^{**} Zn - 0,0046813^{*} Zn^2 + 0,0321617^{**} AC - 0,0001645^{**} AC^2 + 0,0015017^{**} Zn:AC - 0,0000516^{**} Zn^2:AC$ ($R^2 = 0,47$). ** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade.

A aplicação foliar de Zn promoveu aumento sobre o acúmulo de Mn, Fe Cu e S nos grãos de feijão. Como reportado por Kanchinski *et al.* (2020), aplicações de doses foliares de Zn em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é podem promover maiores teores foliares de Zn, P, Ca, Mg, S, Mn, Fe e Cu. As aplicações de Zn em plantas de feijão-comum também podem criar estímulos fisiológicos que favoreçam o acúmulo

de nutrientes como Mn, Fe e Cu nos grãos (KAZEMI POS *et al.*, 2008). Adubações foliares contendo Zn, Fe e Cu também resultam no acréscimo conjunto desses nutrientes, existindo uma interação na sua acumulação pelos grãos, como já relatado em *Triticum aestivum* (STEPIEN; WOJTKOWIAK, 2016).

A aplicação exógena foliar de AC também apresentou efeitos positivos no acúmulo de Cu, Fe, Mn e S. O AC é um importante carreador de nutrientes na planta, atuando no transporte via xilema como ligante dos metais Cu, Fe, Mn e Zn (KUTROWSKA; SZELAG, 2014). Os efeitos do AC podem ser observados em redes metabólicas complexas envolvendo a respiração celular, biossíntese de fitohormônios, aminoácidos, moléculas sinalizadoras e outros metabólitos secundários capazes de atuar no sequestro de íons metálicos (ZAHAN *et al.*, 2021).

A aplicação foliar conjunta de 24 kg ha⁻¹ de Zn e 132,4 g ha⁻¹ de AC resultou no incremento nos grãos de 45,75 % nos teores de S, 18,92 % de Fe, 22,84 % de Cu e 19,1 % de Mn, respectivamente, quando comparados as plantas que não receberam Zn e AC. Os efeitos da pulverização de AC foliar podem refletir na aquisição e acúmulo de nutrientes metálicos pela planta (GHAZIJAANI; HADAVI; JEONG, 2014) e a aplicação foliar de Zn pode refletir em estímulos que resultem também nesse acúmulo pelos grãos (KAZEMI POS *et al.*, 2008). Deste modo, com a aplicação simultânea AC e Zn, é possível obter outros benefícios como a elevação dos teores de micronutrientes metálicos e do S, além da elevação dos teores de Zn nos grãos.

5. CONCLUSÕES

Não houve resposta do feijoeiro à aplicação foliar de Zn e AC no estágio R8, quanto à produtividade de grãos e seus componentes (NVP; NGV; e PCG).

A aplicação foliar de doses Zn e AC no feijoeiro resultou em incrementos nos teores de Zn nos grãos. A aplicação de 24,0 kg ha⁻¹ de Zn e 132,4 g ha⁻¹ de AC proporcionou elevação de 35,3 mg kg⁻¹ para aproximadamente 80 mg kg⁻¹ no teor de Zn nos grãos.

As doses de 24,0 kg ha⁻¹ de Zn e 132,4 g ha⁻¹ de AC que correspondem ao máximo teor de Zn nos grãos, também resultaram no incremento de 10 % nos teores de proteína, 45,75 % de S, 18,92 % de Fe, 22,84 % de Cu e 19,1 % de Mn nos grãos.

6. REFERÊNCIAS

- ABBAS, G. et al. Nutrient uptake, growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by manganese application. **Pakistan Journal of Botany**, v. 43, n. 1, p. 607–616, 2011.
- ABREU, Â. DE F. B. et al. Comunicado 200 Técnico. p. 1–4, 2011.
- ALLAHVERAN, A. et al. Foliar application of ascorbic and citric acids enhanced ‘Red Spur’ apple fruit quality, bioactive compounds and antioxidant activity. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, n. 3, p. 433–440, 2018.
- ALLOWAY, B. J. Zinc in soils and crop production. **International Fertilizer Industry Association, Paris**, p. 139, 2008.
- ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 31, n. 5, p. 537–548, 2009.
- ALLOWAY, B. J. Zinc in Soils and Crop Nutrition. **The Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops**, p. 335–375, 2011.
- ALSHAAL, T.; EL-RAMADY, H. Foliar application: from plant nutrition to biofortification. **Environment, Biodiversity and Soil Security**, v. 1, p. 71–83, 2017.
- AMRI, E.; SHAHSAVAR, A. R. Comparative Efficacy of Citric Acid and Fe(II) Sulfate in the Prevention of Chlorosis in Orange Trees (*Citrus sinensis* L. cv ‘Darabi’). **Journal of Biological and Environmental Sciences**, v. 3, n. 8, p. 61–65, 2015.
- BADAMASI, H.; DAGARI, M. S.; SALE, I. Impacts of citric acid on the phytoextraction of zinc (Zn) using sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) moench) plants. **Malaysian Journal of Analytical Sciences**, v. 24, n. 4, p. 587–598, 2020.
- BARRAMEDA-MEDINA, Y. et al. Zinc biofortification improves phytochemicals and amino-acidic profile in Brassica oleracea cv. Bronco. **Plant Science**, v. 258, p. 45–51, 2017.
- BLAIR, M. W. Mineral biofortification strategies for food staples: The example of common bean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 35, p. 8287–8294, 2013.
- BOUIS, H. E.; SALTZMAN, A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global Food Security**, v. 12, n. January, p. 49–58, 2017.
- BRENNAN, R. F. Zinc application and its availability to plants. n. January 2005, p. 296, 2005.
- BRESSON, J. B. et al. Aplicação de zinco via foliar na cultura do feijoeiro. **Revista Cultivando o Saber**, n. June 2017, p. 88–94, 2018.
- BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007.
- BROUGHTON, W. J. et al. Beans (*Phaseolus* spp.) - model food legumes. **Plant and Soil**, v. 252, n. 1, p. 55–128, 2003.
- BUKOVAC, M. J.; WITTEWER, S. H. Absorption and Mobility of Foliar Applied Nutrients. **Plant Physiology**, v. 32, n. 5, p. 428–435, 1957.

- CAKMAK, I.; HOFFLAND, E. Zinc for the improvement of crop production and human health. **Plant and Soil**, v. 361, n. 1–2, p. 1–2, 2012.
- CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018.
- CAMBRAIA, T. L. L. et al. Agronomic biofortification of common bean grain with zinc. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019.
- CARNEIRO, J. E. DE S. et al. BRSMG Madrepérola: Common bean cultivar with late-darkening Carioca grain. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 12, n. 4, p. 281–284, 2012.
- CASTRO-GUERRERO, N. A. et al. Classroom activities for learners of Korean as a foreign language: From the perspective of multiple intelligences. **Electronic Journal of Foreign Language Teaching**, v. 12, n. May, p. 391–417, 2016.
- CESAR, T. B.; WADA, S. R.; BORGES, R. G. Zinco plasmático e estado nutricional em idosos. **Revista de Nutrição**, v. 18, n. 3, p. 357–365, 2005.
- CHAIRIDCHAI, P.; RITCHIE, G. S. P. The Effect of Citrate and pH on Zinc Uptake by Wheat. **Agronomy Journal**, v. 85, n. 2, p. 322–328, 1993.
- COÊLHO, J. D.; XIMENES, L. F. Feijão : Produção E Mercado. p. 1–7, 2020.
- CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. **Boletim da Safra 2021**, v. 8, n. Terceiro levantamento, p. 59, 2021.
- CRUZ, J. B. F.; SOARES, H. F. Uma revisão sobre o zinco. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 15, n. 1, p. 207–222, 2011.
- DA SILVA, L. D. S. V. et al. Micronutrientes na gestação e lactação. **Revista Brasileira de Saude Materno Infantil**, v. 7, n. 3, p. 237–244, 2007.
- DARANDEH, N.; HADAVI, E. Effect of pre-harvest foliar application of citric acid and malic acid on chlorophyll content and post-harvest vase life of *Lilium* cv. Brunello. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, n. JAN, p. 2011–2013, 2012.
- DE TOLEDO, T. C. F.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Avaliação química e nutricional do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) cozido por diferentes métodos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 2, p. 355–360, 2008.
- DEBJIT BHOWMIK, CHIRANJIB, K. P. S. K. A potential medicinal importance of zinc in human health and chronic disease. **PharmaInterScience**, v. 1, n. 1, p. 5–11, 2010.
- DOMENE, S. M. Á.; PEREIRA, T. C.; ARRIVILLAGA, R. K. DE. Estimativa da disponibilidade de zinco em refeições com preparações padronizadas da alimentação escolar do município de Campinas. **Revista de Nutrição**, v. 21, n. 2, p. 161–167, 2008.
- DWIVEDI, S. L. et al. Diversifying Food Systems in the Pursuit of Sustainable Food Production and Healthy Diets. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 10, p. 842–856, 2017.
- Effect of foliar spray of citric acid on growth and green yield of broad bean (*Vicia faba* L.) grown in southern Iraq. **Journal of Basrah Researches (Sciences)**, p. 1–12, 2013.
- EICHERT, T. et al. Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. **Physiologia Plantarum**, v. 134, n. 1, p. 151–160, 2008.
- EIDYAN, B.; HADAVI, E.; MOALEMI, N. Pre-harvest foliar application of iron sulfate

- and citric acid combined with urea fertigation affects growth and vase life of tuberose (*Polianthes tuberosa* L.) “Por-Par”. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 55, n. 1, p. 9–13, 2014.
- EL-BELTAGI, H. S. et al. Effect of salicylic acid and potassium citrate on cotton plant under salt stress. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 26, n. 1A, p. 1091–1100, 2017.
- EL-YAZAL, M. A. S. The Application of Citric Acid in Combination with Some Micronutrients Increases the Growth, Productivity and a Few Chemical Constituents of Maize (*Zea Mays*) Plants. **International Letters of Natural Sciences**, v. 76, p. 86–97, 2019.
- EMBRAPA. **Origem e história do feijoeiro comum e do arroz**, 2000. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/164370/1/CNPAF-2000-fd.pdf>>
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives**. New York: [s.n.].
- 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, n. 3, p. 390–395, 2000.
- FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO**. Disponível em: <<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/bean/en/>>. Acesso em: 5 jan. 2022.
- FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. H. From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. JUL, p. 1–6, 2013.
- FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação foliar: Fundamentos científicos e técnicas de campo**. São Paulo: [s.n.].
- FERREIRA, D. F. Sisvar: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, v. 6, n. 1, p. 26–41, 2008.
- FESS, T. L.; KOTCON, J. B.; BENEDITO, V. A. Crop breeding for low input agriculture: A sustainable response to feed a growing world population. **Sustainability**, v. 3, n. 10, p. 1742–1772, 2011.
- FIDELIS, R. R. et al. Determinação do teor de proteína em genótipos de feijão comum cultivados em diferentes níveis de nitrogênio. **Ambiência**, v. 15, n. 1, p. 161–172, 2019.
- FRANKE, W. Mechanisms of Foliar Penetration of Solutions. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 18, n. 1, p. 281–300, 1967.
- FREITAS, F. DE O. Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão comum no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1199–1203, 2006.
- FUKADA, T. et al. Zinc homeostasis and signaling in health and diseases. **Journal of Biological Inorganic Chemistry**, v. 16, n. 7, p. 1123–1134, 2011.
- FURLANI, A. M. Nutrição Mineral. In: KERBAUY, G. B. (Ed.). **Fisiologia Vegetal**. 1. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. p. 40–75.
- GHAZIYAHANI, N.; HADAVI, E.; JEONG, B. R. Foliar sprays of citric acid and salicylic acid alter the pattern of root acquisition of some minerals in sweet basil (*Ocimum*

- basilicum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. October, p. 1–7, 2014.
- HAMBIDGE, K. M. et al. Dietary reference intakes for zinc may require adjustment for phytate intake based upon model predictions. **Journal of Nutrition**, v. 138, n. 12, p. 2363–2366, 2008.
- HARDING, K. L.; AGUAYO, V. M.; WEBB, P. Review Article Hidden hunger in South Asia : a review of recent trends and persistent challenges. **Public Health Nutrition**, p. 1–11, 2017.
- HARVEST PLUS**. Disponível em: <<https://www.harvestplus.org/what-we-do/nutrition>>. Acesso em: 3 abr. 2021.
- HAWKESFORD, M. J.; DE KOK, L. J. Managing sulphur metabolism in plants. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 3, p. 382–395, 2006.
- HOJYO, S. et al. Zinc transporter SLC39A10/ZIP10 controls humoral immunity by modulating B-cell receptor signal strength. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 32, p. 11786–11791, 2014.
- HOTZ, C.; BROWN, K. H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations. **Food and Nutrition Bulletin**, v. 25, n. 1 SUPPL. 2, 2004.
- HU, L. et al. Exogenous application of citric acid ameliorates the adverse effect of heat stress in tall fescue (*Lolium arundinaceum*). **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. FEB2016, p. 1–11, 2016.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físicos-químicos para análise de Alimentos**. 4. ed. São Paulo, SP: Instituto Adolfo Lutz, 2008.
- JAAFARI, N.; HADAVI, E. Growth and essential oil yield of Basil (*Ocimum basilicum* L.) as affected by foliar spray of citric acid and salicylic acid. **Zeitschrift fur Arznei- und Gewurzpflanzen**, v. 17, n. 2, p. 80–83, 2012.
- JHA, A. B.; WARKENTIN, T. D. Biofortification of pulse crops: Status and future perspectives. **Plants**, v. 9, n. 1, 2020.
- KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. In: **Africa's potential for the ecological intensification of agriculture**. 4. ed. Boca Raton,: CRC Press, 2010. v. 53p. 1689–1699.
- KANNAN, S. Mechanisms Of Foliar Uptake Of Plant Nutrients: Accomplishments And Prospects. **Journal of Plant Nutrition**, v. 2, n. 6, p. 717–735, 1980.
- KAZEMI POS, H. et al. Effects of Zn Rates and Application Forms on Protein and Some Micronutrients Accumulation in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 11, n. 7, p. 1042–1046, 15 mar. 2008.
- KHAMPUANG, K.; LORDKAEW, S.; DELL, B. Foliar zinc application improved grain zinc accumulation and bioavailable zinc in unpolished and polished rice. **Plant Production Science**, v. 00, n. 00, p. 1–9, 2020.
- KIGEL, J. Culinary and nutritional quality of *Phaseolus vulgaris* seeds as affected by environmental factors. **Biotechnology, Agronomy and Society and Environment**, v. 3, n. 4, p. 205–209, 1999.
- KPOMBLEKOU, A. K.; TABATABAI, M. A. Release and phytoavailability of phosphorus in soils treated with phosphate rocks and organic acids. **Agron Abstracts, Am Soc Agronomy, Madison, Wisconsin, USA** p. v. 276, 1993.
- KUTROWSKA, A.; SZELAG, M. Low-molecular weight organic acids and peptides

- involved in the long-distance transport of trace metals. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 8, p. 1957–1968, 2014.
- LEÃO, M. M.; MALUF, R. S. **A construção social de um sistema público de segurança alimentar e nutricional: a experiência brasileira**. 1. ed. Brasília: ABRANDH, 2012.
- LEMOS, V. T. et al. EFEITO DA APLICAÇÃO DE ÁCIDO CÍTRICO NOS TEORES DE NUTRIENTES FOLIARES E NA QUALIDADE DA BEBIDA DO CAFÉ NO ALTO PARANÁIBA E ALTO JEQUITINHONHA. n. 1998, p. 0–3, 2011.
- LENSBOUER, J. J.; DOYLE, R. P. Secondary transport of metalcitrate complexes: The CitMHS family. **Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology**, v. 45, n. 5, p. 453–462, 2010.
- LOUREIRO, M. P. et al. Biofortificação de alimentos: problema ou solução? **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 25, n. 2, p. 66–84, 2018.
- MA, J. F. et al. Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 401, p. 1335–1341, 2004.
- MAFRA, D.; COZZOLINO, S. M. F. Importância do zinco na nutrição humana. **Revista de Nutrição**, v. 17, n. 1, p. 79–87, 2004.
- MAHDIEH, M. et al. Effect of seed and foliar application of nano-zinc oxide , zinc chelate , and zinc sulphate rates on yield and growth of pinto bean (*Phaseolus vulgaris*) cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 18, p. 2401–2412, 2018.
- MALAVOLTA, E. Funções dos macro e micronutrientes. **Agronômica Ceres**, p. 126–162, 2006.
- MANDOUR, M.; METWALY, H.; ALI, A. Effect of Foliar Spray With Amino Acids , Citric Acid, Some Calcium Compounds and Mono-Potassium Phosphate on Productivity, Storability and Controlling Gray Mould of Strawberry Fruits Under Sandy Soil Conditions. **Zagazig Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 4, p. 985–997, 2019.
- MANOS, M. G. L.; WILKINSON, J. Mapeamento de Controvérsias Sócio-técnicas : o Caso da Biofortificação de Alimentos Básicos no Brasil Mapeamento de Controvérsias Sócio técnicas : o Caso da Biofortificação de Alimentos Básicos no Brasil. **5º Congresso IBERO- Americano em Investigação Qualitativa em Ciências Sociais**, v. 3, n. July, p. 463–8, 2016.
- MAPA, M. A. P. E A. **Regras para análise de sementes (RAS)**. [s.l: s.n.].
- MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition Of Higher Plants**. 3. ed. Oxford-Inglaterra: Academic Press, 2012. v. 3
- MARTINEZ-PACHECO, M. M. et al. Efeito do ácido cítrico sobre a atividade proteolítica de Zea mays L. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 35, n. 5, p. 908–915, 2011.
- MAŠEV, N.; KUTÁČEK, M. The effect of zinc on the biosynthesis of tryptophan, indol auxins and gibberellins in barley. **Biologia Plantarum**, v. 8, n. 2, p. 142–151, 1966.
- MAYER, J. E.; PFEIFFER, W. H.; BEYER, P. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 11, n. 2, p. 166–170, abr. 2008.
- MOHAMED, H. M. A. Effect of Spraying Citric Acid Macro and Micro Nutrients on Yield and Berries Quality of Red Globe Grapevines. **Journal of Horticultural Science & Ornamental Plants**, v. 10, n. 1, p. 53–59, 2018.

- NACHTIGALL, G. R.; NAVA, G. Adubação foliar: fatos e mitos. p. 87–97, 2010.
- NADERGOLI, M. S.; YARNIA, M.; KHOEI, F. R. Effect of Zinc and Manganese and Their Application Method on Yield and Yield Components of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L. CV. Khomein). **Middle-East Journal of**, v. 8, n. 5, p. 859–865, 2011.
- NATALE, W. et al. EFEITOS DA APLICAÇÃO DE ZINCO NO DESENVOLVIMENTO, NO ESTADO NUTRICIONAL E NA PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DE MUDAS DE MARACUJAZEIRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 310–314, 2004.
- NESTEL, P. et al. Symposium: Food Fortification in Developing Countries Biofortification of Staple Food Crops. **J. Nutr**, v. 136, p. 1064–1067, 2006.
- NOGUEIRA, F. D. . et al. Efeito Do Uso De Zinco E Ácido Cítrico Na Produção De Café. n. July, p. 2472–2477, 2001.
- NOVAIS, R.; JCL, N.; NF, B. **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: Ensaio em ambiente controlado, 1991.
- OLMEDILLA-ALONSO, B. et al. Composition of two Spanish common dry beans (*Phaseolus vulgaris*), “Almonga” and “Curruquilla”, and their postprandial effect in type 2 diabetics. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 93, n. 5, p. 1076–1082, 2013.
- OZTURK, L. et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. **Physiologia Plantarum**, v. 128, n. 1, p. 144–152, 2006.
- PANDURANGAN, S. et al. Differential response to sulfur nutrition of two common bean genotypes differing in storage protein composition. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. FEB, p. 1–11, 2015.
- PASALA, R. et al. Recent advances in micronutrient foliar spray for enhancing crop productivity and managing abiotic stress tolerance. **Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change**, p. 377–398, 1 jan. 2022.
- PEREIRA, T. C.; HESSEL, G. Deficiência de zinco em crianças e adolescentes com doenças hepáticas crônicas. **Revista Paulista de Pediatria**, v. 27, n. 3, p. 322–328, 2009.
- PÉREZ-MASSOT, E. et al. The contribution of transgenic plants to better health through improved nutrition: opportunities and constraints. **Genes & Nutrition**, v. 8, n. 1, p. 29–41, 29 jan. 2013.
- PIRI, M.; SEPEHR, E.; RENGEL, Z. Citric acid decreased and humic acid increased Zn sorption in soils. **Geoderma**, v. 341, n. July 2018, p. 39–45, 2019.
- POPOVA, T. N.; PINHEIRO DE CARVALHO, M. Â. A. Citrate and isocitrate in plant metabolism. **Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics**, v. 1364, n. 3, p. 307–325, 1998.
- PRASAD, A. S. Discovery of human zinc deficiency: Its impact on human health and disease. **Advances in Nutrition**, v. 4, n. 2, p. 176–190, 2013.
- RASK, K. J.; RASK, N. Economic development and food production-consumption balance: A growing global challenge. **Food Policy**, v. 36, n. 2, p. 186–196, 2011.
- RELLÁN-ÁLVAREZ, R. et al. Identification of a Tri-Iron(III), Tri-Citrate Complex in the Xylem Sap of Iron-Deficient Tomato Resupplied with Iron: New Insights into Plant Iron

- Long-Distance Transport. **Plant and Cell Physiology**, v. 51, n. 1, p. 91–102, 2010.
- RIBEIRO, A. C. ; GUIMARÃES, P. T. G. ; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5° Aproximação**. 1. ed. Viçosa, MG: Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.
- ROCHA, V. P. C. et al. Adaptabilidade e estabilidade da característica produtividade de grãos dos grupos comerciais carioca e preto de feijão. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p. 39, 2010.
- SALTZMAN, A. et al. Availability, production, and consumption of crops biofortified by plant breeding: current evidence and future potential. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1390, n. 1, p. 104–114, 2017.
- SALVADOR, C. A. Feijão - Análise da Conjuntura Agropecuária. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 178–185, 2018.
- SANTANA, M. J. DE et al. Viabilidade técnica e econômica da aplicação de água na cultura do feijoeiro comum (*Phaseolus Vulgaris* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 2, p. 532–538, 2009.
- SANTOS, S. R. et al. Citric acid influence on soil phosphorus availability. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 15, p. 2138–2145, 2017.
- SHEKARI, F. et al. SPRING WHEAT YIELDING AND THE CONTENT OF PROTEIN AND ZINC IN ITS GRAIN DEPENDING ON ZINC FERTILISATION. **ELECTRONIC JOURNAL OF POLISH AGRICULTURAL UNIVERSITIES**, v. 18, n. 1, 2015.
- SHLIZERMAN, L. et al. Iron-shortage-induced increase in citric acid content and reduction of cytosolic aconitase activity in Citrus fruit vesicles and calli. **Physiologia Plantarum**, v. 131, n. 1, p. 72–79, 2007.
- SIGHT AND LIFE. **Micronutrients, Macro Impact: The story of vitamins and a hungry world** (J. H. R. Klaus Kraemer, Jane Badham, Parul Christian, Ed.). Basel: Sight and Life, 2012. Disponível em: <<http://www.sightandlife.org/library.html>>
- SILVA, M. M. DA et al. Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de feijão-comum produzidas no norte de Minas Gerais. **Revista Agro@Mambiente on-Line**, v. 8, n. 1, p. 97, 2014.
- SKALNY, A. V.; ASCHNER, M.; TINKOV, A. A. The Latest Research and Development of Minerals in Human Nutrition. **Advances in Food and Nutrition Research**, v. 96, p. 251–310, 2021.
- SKOOG, F. Relationships Between Zinc and Auxin in the Growth of Higher Plants. **American Journal of Botany**, v. 27, n. 10, p. 939, 1940.
- SOLTANI, S. M. Effect of Foliar Application of Zinc and Phosphorous on Their Dynamic, Biofortification, and on Grain Protein Content of Two Rice Cultivars (Hashemi and Guilaneh). **IRANIAN JOURNAL OF SOIL AND WATER RESEARCH**, p. 2065–2083, 2020.
- SOUZA, J. E. B.; FERREIRA, E. P. DE B. Improving sustainability of common bean production systems by co-inoculating rhizobia and azospirilla. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 237, p. 250–257, 2017.
- STEPIEN, A.; WOJTKOWIAK, K. Effect of foliar application of Cu, Zn, and Mn on yield and quality indicators of winter wheat grain. **Chilean journal of agricultural research**,

v. 76, n. 2, p. 219–226, jun. 2016.

SUN, Y. L.; HONG, S. K. Effects of citric acid as an important component of the responses to saline and alkaline stress in the halophyte *Leymus chinensis* (Trin.).

Plant Growth Regulation, v. 64, n. 2, p. 129–139, 2011.

SZEREMENT, J. et al. Agronomic Biofortification with Se, Zn, and Fe: An Effective Strategy to Enhance Crop Nutritional Quality and Stress Defense—A Review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 1, p. 1129–1159, 3 mar. 2022.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. São Paulo, SP: Artmed, 2007.

TALEBI, M.; HADAVI, E.; JAAFARI, N. Foliar Sprays of Citric Acid and Malic Acid Modify Growth, Flowering, and Root to Shoot Ratio of *Gazania rigens* L.: A Comparative Analysis by ANOVA and Structural Equations Modeling. **Advances in Agriculture**, v. 2014, p. 1–6, 2014.

TUSEI, C. The Effects of Citric Acid on pH and Nutrient Uptake in Wheatgrass (*Triticum aestivum*). **IdeaFest**, v. 3, 2019.

VALENÇA, A. W. et al. Agronomic biofortification of crops to fight hidden hunger in sub-Saharan Africa. **Global Food Security**, v. 12, n. December 2016, p. 8–14, 2017.

VIDYAVATI, S.; SNEHA, A.; KATTI, S. Zinc: The importance in human life. **International J. of Healthcare and Biomedical Research**, v. 4, n. July, p. 18–20, 2016.

WEI, L.; CHEN, C.; XU, Z. Citric acid enhances the mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 46, n. 7, p. 765–769, 2010.

WELCH, R. M.; GRAHAM, R. D. Breeding crops for enhanced micronutrient content. **Plant and Soil**, v. 245, n. 1, p. 205–214, 2002.

WELCH, R. M.; NORVELL, W. A. Growth and nutrient uptake by Barley (*Hordeum vulgare* L. cv Herta): Studies using an N-(2-hydroxyethyl)ethylenedinitrioltriacetic acid-buffered nutrient solution technique: II. Role of zinc in the uptake and root leakage of mineral nutrients. **Plant Physiology**, v. 101, n. 2, p. 627–631, 1993.

WESSELLS, K. R.; BROWN, K. H. Estimating the Global Prevalence of Zinc Deficiency: Results Based on Zinc Availability in National Food Supplies and the Prevalence of Stunting. **PLOS ONE**, v. 7, n. 11, 2012.

WESSELLS, I.; RINK, L. Micronutrients in autoimmune diseases: possible therapeutic benefits of zinc and vitamin D. **Journal of Nutritional Biochemistry**, v. 77, p. 108240, 2020.

WUANA, R. A.; OKIEIMEN, F. E.; IMBORVUNGU, J. A. Removal of heavy metals from a contaminated soil using organic chelating acids. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 7, n. 3, p. 485–496, 2010.

XIE, X. et al. Interactions Between Phosphorus, Zinc, and Iron Homeostasis in Nonmycorrhizal and Mycorrhizal Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. September, p. 1–15, 2019.

YASUDA, H. et al. Infantile zinc deficiency: Association with autism spectrum disorders. **Scientific Reports**, v. 1, p. 1–5, 2011.

ZAHAN, M. I. et al. Citric acid-mediated abiotic stress tolerance in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 13, p. 7235, 2021.

7. APÊNDICE

A.

Resumo da análise dos modelos em superfície de resposta projetados para o teor Zn, Proteína, Fe, Cu, Mn e S presentes nos grãos em função dos tratamentos de Zn e Ac aplicados via foliar no feijoeiro.

Modelo	f ([Zn], [AC])	R ²	f'([Zn], [AC])	Pontos de máximo acúmulo ([Zn], [AC])	Máximo teor no grão	Teor na dose ([24], [132,37])
Figura 2 Zinco (mg kg ⁻¹)	$Z = 34,9672882 + 3,3026211^{**} Zn - 0,0734695^{**} Zn^2 + 0,0744792^{**} AC - 0,0004399^{**} AC^2 + 0,0017459^{**} Zn:AC$	0,87	$([3,3026211 - 0,146939 Zn + 0,0017459 AC], [0,0744792 - 0,001679 AC + 0,0017459 Zn])$	$([24,04], [132,378])$	79,609	-
Figura 3 Proteína nos grãos (%)	$Z = 19,7506579 + 0,3110265^{**} Zn - 0,0107457^{**} Zn^2 - 0,0000203^{**} AC^2 + 0,0006489^{**} Zn:AC - 0,0000024^{*} Zn:AC^2$	0,64	$([0,3110265 - 0,0214914 Zn + 0,0006489 AC - 0,0000024 AC^2], [-0,0000406 AC + 0,0006489 Zn - 0,0000048 Zn:AC])$	$([16,275], [88,9175])$	22,436	21,722
Figura 4 Ferro (mg kg ⁻¹)	$Z = 75,5672825 + 0,8208423 Zn - 0,0263537 Zn^2 - 0,0772335 AC - 0,0000489 AC^2 + 0,0447015^{**} Zn:AC - 0,0012481^{**} Zn^2:AC - 0,0001914^{**} Zn:AC^2 + 0,0000054^{**} Zn^2:AC^2$	0,60	$([0,8208423 - 0,0527074 Zn + 0,0447015 AC - 0,0024962 Zn:AC - 0,0001914 AC^2 + 0,0000108 Zn:AC^2], [-0,0772335 - 0,0000978 AC + 0,0447015 Zn - 0,0012481 Zn^2 - 0,0003828 Zn:AC + 0,0000108 Zn^2:AC])$	$([17,35], [92,4893])$	96,795	89,8689

Figura 5 Cobre (mg kg ⁻¹)	$Z = 3,3781869 - 0,0247491 \text{ Zn} + 0,0007417 \text{ Zn}^2 + 0,0071021 \text{ ** AC} - 0,0000368 \text{ ** AC}^2 + 0,0005479 \text{ ** Zn:AC} - 0,0000144 \text{ * Zn}^2:\text{AC}$	0,50	$([- 0,0247491 + 0,0014834 \text{ Zn} + 0,0005479 \text{ AC} - 0,0000288 \text{ Zn:AC}], [0,0071021 - 0,0000616 \text{ AC} + 0,0005479 \text{ Zn} - 0,0000144 \text{ Zn}^2])$	$([19,8374], [199,7449])$	4,1685	4,1494
Figura 6 Manganês (mg kg ⁻¹)	$Z = 15,7477698 + 0,1434873 \text{ ** Zn} - 0,0046813 \text{ * Zn}^2 + 0,0321617 \text{ ** AC} - 0,0001645 \text{ ** AC}^2 + 0,0015017 \text{ ** Zn:AC} - 0,0000516 \text{ ** Zn}^2:\text{AC}$	0,47	$([0,1434873 - 0,0093626 \text{ * Zn} + 0,0015017 \text{ AC} - 0,0001032 \text{ Zn:AC}], [0,0321617 - 0,000329 \text{ AC} + 0,0015017 \text{ Zn} - 0,0000516 \text{ Zn}^2])$	$([14,8622], [130,9496])$	19,667	18,7064
Figura 7 Enxofre (g kg ⁻¹)	$Z = 1,978310397 + 0,0041405717 \text{ Zn} + 0,0000618205 \text{ Zn}^2 + 0,006127087 \text{ ** AC} - 0,0000202565 \text{ ** AC}^2 + 0,0002570557 \text{ ** Zn:AC} - 0,0000065846 \text{ ** Zn}^2:\text{AC}$	0,87	$([4,1405717 + 0,123641 \text{ Zn} + 0,2570557 \text{ AC} - 0,0131692 \text{ Zn}], [6,127087 - 0,040513 \text{ AC} + 0,2570557 \text{ Zn} - 0,0065846 \text{ Zn}^2])$	$([21,9735], [200])$	3,00181	2,883

** Significativo a 5 % de probabilidade; * significativo a 10 % de probabilidade; ^{Ns} não significativo.

B.

Tabela 1. Análise de variância (ANOVA) para o efeito da aplicação via foliar de Zn e AC no número de grãos por planta (NGP), número de vagens por planta (NVP), número de grãos por vagem (NGV), produção de massa de grãos (PMG) por planta e o peso de 100 grãos (PCG) de plantas de feijoeiro.

Fontes de variação	Critério Avaliado					
	GL	NGP	NVP	NGV	PMG	PCG
Bloco	2	< 0,0001**	< 0,0001**	0,5409 ^{NS}	< 0,0001**	0,0865 ^{NS}
Zinco	3	0,8419 ^{NS}	0,6912 ^{NS}	0,8730 ^{NS}	0,4641 ^{NS}	0,4567 ^{NS}
Ácido Cítrico	3	0,8700 ^{NS}	0,5401 ^{NS}	0,4207 ^{NS}	0,1862 ^{NS}	0,1955 ^{NS}
Zn x AC	9	0,0560 ^{NS}	0,3489 ^{NS}	0,8045 ^{NS}	0,0748 ^{NS}	0,0755 ^{NS}
CV (%)		7,3	12,65	13,64	8,27	8,77

* Significante para 10 %; ** significância para 5 % e ^{NS} não significativo.