



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias
Licenciatura em Ciências Agrárias
Campus III-Bananeiras

JONAS PESSOA DE MELO

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO FEIJÃO-COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.)
PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO COM FERRO**

BANANEIRAS - PB

2025

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO FEIJÃO-COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.)
PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO COM FERRO**

Trabalho apresentado ao Curso de
Licenciatura em Ciências Agrárias
do Centro de Ciências Humanas,
Sociais e Agrárias da Universidade
Federal da Paraíba, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Licenciado em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Alexandre Diniz Neto

BANANEIRAS - PB

2025

**Catálogo na publicação Seção de
Catálogo e Classificação**

M528b Melo, Jonas Pessoa de.

Biofortificação agrônômica do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) pelo
manejo da adubação com ferro / Jonas Pessoa de Melo. - Bananeiras-PB, 2025.
25 f.

Orientação: Manoel Neto.

TCC (Graduação) - Ciências Agrárias

- UFPB/CCHSA.

1. Fabaceae. 2. Micronutriente. 3. Qualidade nutricional. I. Neto, Manoel.
II. Título.

UFPB/CCHA/BSPJAT

CDU 631

**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO FEIJÃO-COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.)
PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO COM FERRO**

Trabalho apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências Agrárias do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Licenciado em Ciências Agrárias.

Trabalho de Conclusão de Curso avaliado em: 08/05/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL ALEXANDRE DINIZ NETO**
Data: 27/05/2025 10:45:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Alexandre Diniz Neto (orientador)

DA/CCHSA/UFPB
 **LUCAS BORCHARTT BANDEIRA**
Data: 27/05/2025 14:04:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Borchartt Bandeira (examinador)

DCSA/CCHSA/UFPB
 **WANDERLEY FEITOSA VIANA**
Data: 27/05/2025 20:43:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mestrando Wanderley Feitosa Viana (examinador)

PPGCAG/CCHSA/UFPB
Documento assinado digitalmente
 **JOSE TAVARES DE FREITAS**
Data: 27/05/2025 15:18:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mestrando José Tavares de Freitas(examinador)
PPGCAG/CCHSA/UFPB

AGRADECIMENTOS

Ofereço a minha gratidão principalmente a Deus, criador de todas as coisas e gestor de toda inteligência que emana no universo, grato pela força, paciência e coragem a mim concedido para conseguir permanecer firme perante todas as dificuldades durante a trajetória.

Agradeço aos meus pais, Luís Marques de Melo e Maria Teresa de Jesus Pessoa de Melo que durante todos os anos de estudo me ofereceram todo o apoio necessário, me incentivaram firmemente e não me deixaram fraquejar.

Agradeço ao meu professor orientador Manoel Alexandre Diniz Neto, por me direcionar e viabilizar meus esforços acreditando sempre no meu potencial.

Também agradeço ao técnico do laboratório de solos Everton Oliveira Teixeira, que me orientou e me ajudou no processo de análises laboratoriais.

Gratidão também aos meus colegas graduandos que me ajudaram na maioria das etapas de execução do experimento, são eles: Lino Garcia da Silva Neto, Tayná Medeiros da Silva, Amanda Cíntia Pinto Ferreira, Marcos Estefene Alves de Almeida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Número de vagens em plantas de feijão-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.....	15
Figura 2 - Teores de clorofila “a” em folhas de plantas de feijão-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.	16
Figura 3 - Teores de clorofila “b” em folhas de plantas de feijão-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.	17
Figura 4 - Teores de clorofila “total” em folhas de plantas de feijão-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.	18
Figura 5 - Concentração de ferro em grãos de feijão-comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.	19

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	10
2.1	Panorama do feijão comum no Brasil.....	10
2.2	Biofortificação agrônômica com ferro.....	11
3	MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1	Localização	12
3.2	Condução do Experimento.....	13
3.3	Variáveis Analisadas	14
3.4	Análise Estatística	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4.2	Teores de clorofila “a”	16
4.3	Teores de clorofila “b”	16
4.4	Teores de clorofila “total”.....	17
4.5	Concentração de ferro nos grãos.....	18
5	CONCLUSÕES.....	19
6	AGRADECIMENTOS	20
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO FEIJÃO-COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.) PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO COM FERRO

RESUMO

Jonas Pessoa de Melo¹

Manoel Alexandre Diniz Neto²

A biofortificação agronômica com ferro (Fe) constitui uma estratégia promissora para o enriquecimento nutricional do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). objetivou-se com esse estudo avaliar o desempenho produtivo, os teores de clorofila e a concentração de ferro nos grãos do feijoeiro em resposta ao manejo da adubação radicular com ferro. O experimento foi conduzido na área experimental do Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Campus III, em Bananeiras-PB, microrregião do Brejo Paraibano. O delineamento experimental utilizado foi cultivar Crioula, blocos casualizados contendo cinco tratamentos correspondentes às doses de ferro de 25, 30, 35, 40 e 45 mg dm⁻³, com quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais. A dose de 25 mg dm⁻³ foi adotada como controle, por representar o teor natural de Fe no solo. Foi utilizada a cultivar de feijão Crioula. As variáveis analisadas foram: número de vagens por planta, as concentrações de clorofilas “a”, “b” e total e o teor de Fe nos grãos. Os resultados indicam que a faixa entre 30 e 40 mg dm⁻³ proporciona ganhos simultâneos em produtividade, eficiência fotossintética e acúmulo de ferro nos grãos. Os teores de clorofilas “b” e total foram positivamente influenciados pelas doses crescentes de Fe, e as concentrações de Fe nos grãos aumentou proporcionalmente com o aumento das doses de Fe na adubação. Portanto, a biofortificação agronômica quando bem manejada, é uma alternativa viável para o enriquecimento do feijão-comum com ferro, sem comprometer o desempenho agrônomo da cultura.

Palavras-chave: Fabaceae; Micronutriente; Qualidade nutricional.

ABSTRACT

Agronomic biofortification with iron (Fe) is a promising strategy for enhancing the nutritional value of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). This study aimed to evaluate the productive performance, chlorophyll content, and iron concentration in common bean grains in response to soil fertilization management with iron. The experiment was conducted in the experimental area of the Center for Human, Social and Agrarian Sciences at the Federal University of Paraíba, Campus III, in Bananeiras-PB, in the microregion of Brejo Paraibano. The experimental design used was a randomized block design with the Crioula cultivar, consisting of five treatments corresponding to iron doses of 25, 30, 35, 40, and 45 mg dm⁻³, with four replications, totaling 20 experimental units. The 25 mg dm⁻³ dose was used as a control, as it represents the natural Fe level in the soil. The Crioula bean cultivar was used. The variables analyzed were: number of pods per plant, concentrations of chlorophyll “a”, “b” and total, and Fe content in the grains. The results indicate that the range between 30 and 40 mg dm⁻³ provides simultaneous gains in productivity, photosynthetic efficiency, and iron accumulation in the

¹UFPB, CAMPUS III, BANANEIRAS: jonaspeessoa18@outlook.com

²UFPB, CAMPUS III, BANANEIRAS: manoel.alexandre@academico.ufpb.br

grains. Chlorophyll “b” and total levels were positively influenced by increasing Fe doses, and the iron concentration in the grains increased proportionally with the iron fertilization. Therefore, when properly managed, agronomic biofortification is a viable alternative for enriching common beans with iron without compromising the crop's agronomic performance.

Keywords: Fabaceae; Micronutrient; Nutritional quality.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se entre os principais países produtores e consumidores de feijão-comum no mundo, com uma estimativa de colheita de 3,1 milhões de toneladas em 2024 (IBGE, 2024). Essa cultura tem papel fundamental tanto no aspecto socioeconômico — dada a expressiva participação de pequenos agricultores e trabalhadores rurais em sua produção — quanto na segurança alimentar, sendo uma das principais alimentos consumidos por populações de baixa renda (Chaves *et al.*, 2024).

Considerado um alimento básico de grande importância nutricional, o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta ampla aceitação, sobretudo na América Latina, África e Oriente Médio (Lacerda *et al.*, 2020). Essa fabaceae se destaca por seu valor nutricional, devido ao elevado teor de proteínas, fibras, carboidratos, além de vitaminas e minerais em proporções relevantes (Ronko *et al.*, 2021). Assim, seu consumo é essencial para o suprimento nutricional de grupos populacionais com ingestão limitada de alimentos de origem animal ou em situação de vulnerabilidade socioeconômica (Figueiredo, 2016).

O ferro, embora seja o segundo metal mais abundante na crosta terrestre, apresenta baixa solubilidade e é vital tanto para o metabolismo vegetal quanto humano (Abbaspour; Hurrell; Kelishadi, 2014; Broadley; et al., 2012). No solo e em soluções nutritivas, o ferro está predominantemente presente na forma de quelatos, embora os íons Fe^{2+} e Fe^{3+} também possam ser absorvidos pelas plantas (Lovato *et al.*, 2017). No organismo humano, esse micronutriente integra moléculas essenciais, como proteínas e a hemoglobina, responsável pelo transporte de oxigênio (Broadley; et al., 2012).

A biodisponibilidade do ferro no solo é regulada por diversos fatores, incluindo o pH, a presença de outros cátions metálicos como Cu, Mn e Zn, teores de matéria orgânica, fósforo, além das condições de aeração e umidade do solo (Vasques *et al.*, 2020). Os teores foliares adequados de ferro variam de 50 a 150 mg kg^{-1} de matéria seca, sendo que concentrações superiores a 500 mg kg^{-1} podem resultar em toxidez às plantas (Broadley *et al.*, 2012).

A deficiência de ferro é considerada a carência nutricional de maior prevalência global, afetando cerca de dois bilhões de pessoas e resultando em aproximadamente um milhão de óbitos anuais (Costa *et al.*, 2023). Crianças e gestantes estão entre os grupos mais suscetíveis, dada a maior demanda por ferro em fases de crescimento e gestação (Azevedo; Almeida; Szarfarc, 2016).

Frente a esse cenário, diferentes estratégias têm sido desenvolvidas para aumentar o conteúdo de ferro em alimentos vegetais e melhorar sua biodisponibilidade, seja por meio da

redução de fatores antinutricionais ou pelo enriquecimento mineral (Lovato *et al.*, 2017). A biofortificação desponta como uma alternativa promissora, visando ao incremento de nutrientes nas porções comestíveis das culturas agrícolas, seja por técnicas agronômicas (adubação via solo ou foliar) ou por meio do melhoramento genético (Rosa *et al.*, 2024).

O feijão-comum é uma das espécies priorizadas por iniciativas de biofortificação, como o programa HarvestPlus[®], que busca o desenvolvimento de cultivares com maior teor de micronutrientes essenciais, como ferro, zinco e vitamina A. A variabilidade genética observada nos genótipos de feijão em relação ao acúmulo de micronutrientes torna essa cultura uma candidata viável para programas de biofortificação (Blair; et al., 2010; Talukder *et al.*, 2010). O HarvestPlus[®] estabeleceu como meta o alcance de 107 $\mu\text{g g}^{-1}$ de ferro nos grãos de feijão biofortificado (Bouis; et al., 2011). Nesse contexto, considerando a importância nutricional do ferro, é essencial o desenvolvimento de estudos voltados à biofortificação do feijão, a fim de contribuir para o combate à anemia e outras enfermidades relacionadas à deficiência desse micronutriente (Figueiredo, 2016).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo avaliar o desempenho produtivo, os teores de clorofila e a concentração de ferro nos grãos do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), em resposta ao manejo da adubação radicular com ferro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama do feijão comum no Brasil

A produção do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) ocorre em diversas regiões do Brasil, devido à sua ampla adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, o que possibilita seu cultivo ao longo de todo o ano em vários estados. A semeadura acontece em três épocas distintas: a “safra das águas” (1ª safra), a “safra da seca” (2ª safra) e a “safra de inverno” (3ª safra). Em 2023, a produção total alcançou 2.899.043 toneladas. A safra das águas, cultivada entre outubro e dezembro, é favorecida pela elevada precipitação, o que contribui para o bom desenvolvimento das plantas e a colheita. Já a safra da seca ocorre entre janeiro e fevereiro, período marcado por baixos índices pluviométricos. Por sua vez, a safra de inverno é cultivada entre abril e julho, exigindo irrigação para garantir o desenvolvimento da cultura (Silva *et al.*, 2023).

No entanto, conforme destacado por Cabral (2024), esse calendário não pode ser generalizado para todo o território nacional, pois varia de acordo com as condições específicas de cada região.

Segundo dados do (IBGE, 2023), os principais estados produtores de feijão-comum em 2023 foram: Paraná (24%), Minas Gerais (20%), Goiás (12%), Mato Grosso (10%) e São Paulo (8%), respondendo por grande parte da produção nacional. A região Sul destacou-se como a maior produtora, com aproximadamente 29% do total, enquanto o Nordeste apresentou a maior área cultivada, mas com uma das menores participações na produção nacional, contribuindo com apenas 13,9%. Essa baixa produtividade é atribuída ao reduzido nível de tecnificação, característico da agricultura familiar predominante na região (Cabral, 2024).

De acordo com (Coêlho, 2021), a baixa tecnificação entre os agricultores familiares decorre, em geral, da escassez de recursos financeiros e do cultivo consorciado com outras culturas, o que limita o uso de tecnologias mais avançadas.

2.2 Biofortificação agronômica com ferro

A biofortificação agronômica com ferro (Fe) pode ser realizada por meio da aplicação de fertilizantes minerais ou orgânicos, tanto via adubação radicular quanto por adubação foliar. A eficiência dessa prática, no entanto, depende de múltiplos fatores, como a biodisponibilidade do Fe no solo, sua translocação e acúmulo nos tecidos vegetais, as perdas associadas ao processamento dos grãos (como descascamento e moagem) e, por fim, a absorção e utilização do mineral pelo organismo humano (Colodete, 2024; Kok *et al.*, 2018).

O pH do solo influencia diretamente a disponibilidade de ferro para as plantas. Em solos neutros a alcalinos, mesmo que haja ferro em quantidade suficiente, ele se torna indisponível devido à sua precipitação em formas insolúveis. Já em solos ácidos, o ferro permanece mais solúvel e, portanto, mais facilmente absorvido pelas plantas (Rout; Sahoo, 2015). Segundo (Molnár *et al.*, 2023), o Fe ocorre predominantemente nas formas Fe^{2+} (ferroso), Fe^{3+} (férico) e associado a complexos orgânicos. Devido à baixa solubilidade do Fe^{3+} , as plantas absorvem preferencialmente Fe^{2+} e formas complexadas solúveis. A disponibilidade desse micronutriente é modulada por atributos do solo como pH, teor de matéria orgânica, umidade, temperatura e atividade microbiana.

Para otimizar a absorção de Fe, as plantas evoluíram dois mecanismos fisiológicos distintos. O mecanismo I, predominante em dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramíneas, promove a acidificação da rizosfera e a redução do Fe^{3+} a Fe^{2+} por meio de enzimas redutases. Já o mecanismo II, característica das gramíneas, baseia-se na exsudação de fitossideróforos — quelantes naturais de Fe — que formam complexos solúveis (Fe^{3+} -FS) prontamente absorvidos por transportadores específicos presentes nas raízes (Lucena; Hernandez-Apaolazza, 2017). A principal distinção entre os dois mecanismos reside na forma química do Fe absorvido: Fe^{2+} no

mecanismo I e Fe^{3+} no mecanismo II (Connorton; Balk; Rodríguez-Celma, 2017). Esses mecanismos são fundamentais para o manejo da deficiência de Fe e representam importantes alvos no desenvolvimento de tecnologias agronômicas mais eficazes (Lucena; Hernandez-Apolazza, 2017).

É relevante destacar que o Fe possui alta afinidade por ligantes como fosfatos e ácidos orgânicos e compartilha vias de transporte com outros micronutrientes, o que pode resultar em antagonismos nutricionais. A aplicação excessiva de Fe pode interferir na absorção de manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) (Santos *et al.*, 2017). Estudos demonstram que em arroz, o excesso de Fe prejudica a absorção de Mn (Schmidt *et al.*, 2013); em trigo cultivado em solo calcário, a aplicação de Fe aumentou sua absorção, mas reduziu a de Mn, Zn e Cu (Henriques *et al.*, 2022); enquanto na pitanga (*Eugenia uniflora* L.), observou-se redução nos teores foliares de Mn, Zn, Cu e P quando expostas ao excesso de ferro (Jucoski *et al.*, 2016). Para mitigar tais efeitos, recorre-se à utilização de fertilizantes quelatados, como Fe-EDDHA, Fe-citrato e EDTA- Na_2Fe , além de fontes orgânicas como biochar e esterco, que apresentam melhor custo-benefício em comparação aos quelantes sintéticos (Albuquerque *et al.*, 2015; Ramzani *et al.*, 2016).

Adicionalmente, os micro-organismos do solo, especialmente os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), desempenham papel relevante na mobilização do Fe. Esses simbioses expandem a área de absorção radicular por meio do micélio extraradicular e promovem a absorção de nutrientes e água, recebendo em troca fotoassimilados do hospedeiro (Smith; Smith, 2011). Os FMAs também aumentam a disponibilidade de Fe por mecanismos complementares, como a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (ex.: acético, oxálico, glucônico e cítrico) (Costa *et al.*, 2024). Produção de fitossideróforos (como rizoferrina, ferrocrocina e cropogen) (Haselwandter *et al.*, 2020; Winkelmann, 2017), e ativação de enzimas vegetais como a Fe quelato redutase, que converte Fe^{3+} em Fe^{2+} , aumentando sua assimilação pelas raízes (Colodete, 2024; Rahman *et al.*, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização

A pesquisa foi realizada na área experimental, em uma estufa climatizada no Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, situada no Campus III, em Bananeiras-PB, pertencente à microrregião do Brejo paraibano. Essa área está a uma altitude de 552 metros e possui coordenadas geográficas de 6°41'11" de latitude sul e 35°37'41"

de longitude oeste, em relação ao meridiano de Greenwich. O clima local é caracterizado como quente e úmido, com temperaturas que variam entre 18° C (mínima) e 36° C (máxima), conforme dados do IBGE (2024). Segundo a classificação climática de (Medeiros; Cavalcanti; Duarte, 2020), a região apresenta clima do tipo As', predominando calor e umidade, com estação chuvosa entre os meses de março e agosto e uma média anual de precipitação que varia de 700 a 1.200 mm (Matos *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2017).

3.2 Condução do Experimento

O experimento foi desenvolvido utilizando a cultivar Crioula de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco tratamentos correspondentes a diferentes concentrações de ferro: 25, 30, 35, 40 e 45 mg dm⁻³, composto por quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais. A dose de 25 mg dm⁻³ foi utilizada como controle, por representar o teor de ferro naturalmente presente no solo da área experimental, conforme análise prévia.

A aplicação do ferro foi realizada utilizando sulfato ferroso diluído em água destilada. Durante o ciclo da cultura, aplicaram-se 50 mL da solução por planta, via solo, em duas ocasiões com intervalo de trinta dias entre elas.

Para irrigação, empregou-se um sistema automatizado por gotejamento, programado para funcionar duas vezes ao dia por 2 minutos, o que permitiu fornecer cerca de 200 mL de água por planta, atingindo a capacidade de campo do solo.

A semeadura foi feita em vasos de polietileno com capacidade de 5 dm³, preenchidos com Latossolo Amarelo distrófico, conforme classificação da (EMBRAPA, 2018). A colheita ocorreu aos 120 dias após a semeadura.

Antes do início do experimento, amostras do solo foram coletadas para análise de fertilidade no Laboratório de Solos do CCHSA/UFPB. As amostras foram secas à sombra, destorroadas e peneiradas em malha 200 mesh para padronização granulométrica. As análises seguiram os procedimentos descritos por (EMBRAPA, 2017), resultando nos seguintes valores: pH = 6,44; Fósforo (P) = 8,64 mg dm⁻³; Potássio (K) = 0,12 cmolc dm⁻³; Sódio (Na) = 0,16 cmolc dm⁻³; Cálcio (Ca) = 3,10 cmolc dm⁻³; Magnésio (Mg) = 1,50 cmolc dm⁻³; Alumínio (Al³⁺) = 0,00 cmolc dm⁻³; H⁺ + Al³⁺ = 5,78 cmolc dm⁻³; Zinco (Zn²⁺) = 1,03 mg dm⁻³; Ferro (Fe²⁺) = 25 mg dm⁻³; Enxofre (S) = 16,70 mg dm⁻³; Soma de Bases (SB) = 4,88 cmolc dm⁻³; Capacidade de Troca de Cátions (CTC) = 10,65 cmolc dm⁻³; Saturação por bases (V) = 45,79%; Matéria Orgânica (MO) = 30,19 g kg⁻¹.

3.3 Variáveis Analisadas

Foram avaliadas o número de vagens por planta, as concentrações de clorofila “a”, “b” e “total” e as concentrações de ferro nos grãos.

Após a colheita, as vagens foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60° C, até que atingissem peso constante. Em seguida, o material seco foi triturado em moinho de facas do tipo Willey, obtendo-se cerca de 20g de biomassa em pó. Este material passou por digestão úmida em sistema aberto, conforme o método descrito por (Nova *et al.*, 2012).

Posteriormente, as amostras foram analisadas no Laboratório de Cromatografia e Espectrofotometria (LaCE) do CCHSA/UFPB, onde foi realizada a quantificação de ferro nos tecidos vegetais dos grãos. Para o preparo das soluções minerais, pesaram-se 1 g de amostra em tubos de Kjeldahl e realizaram-se as digestões com 8 mL de uma mistura de ácido com peróxido de hidrogênio (HNO₃:H₂O₂, proporção 6:2), a 150° C por 5 horas. A solução obtida foi diluída com água destilada, filtrada em papel qualitativo e completada para 25 mL.

Para a determinação do teor de ferro nos grãos, utilizou-se espectrofotômetro de absorção atômica com atomização em chamas, modelo iCE 3500 (Thermo Scientific, Cambridge, Inglaterra). O equipamento operou em modo de absorção atômica, utilizando lâmpada de cátodo oco para ferro (Photron, Victoria, Austrália) como fonte de radiação primária, e correção de fundo realizada com lâmpada de deutério. A curva padrão foi elaborada com solução específica para ferro (Specsol, São Paulo, Brasil). Os parâmetros do equipamento seguiram as orientações do fabricante, e os dados foram processados com o software SOLAAR (Thermo Scientific, Cambridge, Inglaterra).

Os Índices de Clorofila Foliar (ICF) foram medidos com o equipamento portátil ClorofiLOG (modelo CFL 1030, FALKER), que realiza leitura digital dos teores de clorofila “a”, “b” e “total”. As medições foram feitas no limbo foliar entre 9h e 11h da manhã, conforme instruções do fabricante (FALKER[®], 2022).

3.4 Análise Estatística

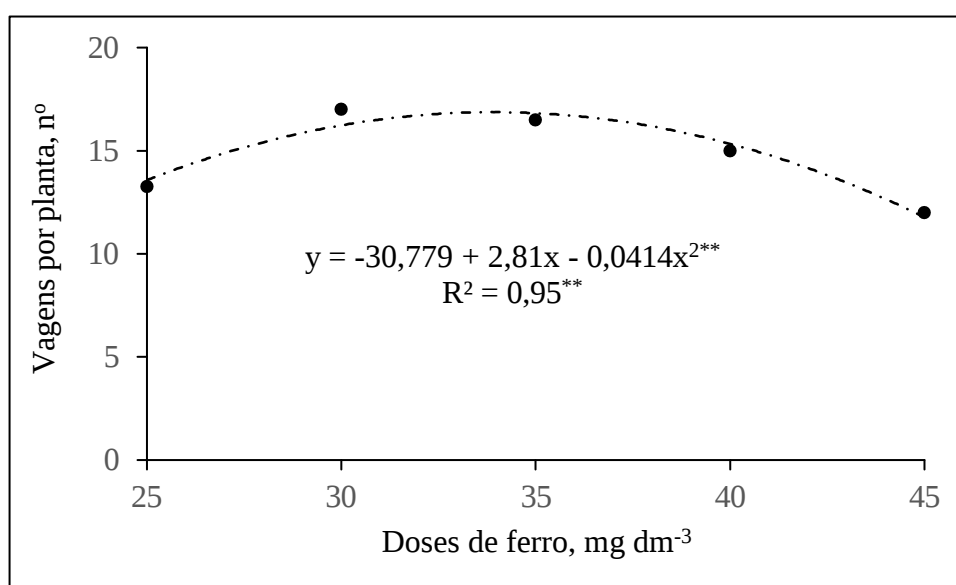
Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com base no teste F. Quando identificado efeito significativo das doses de ferro, procedeu-se à análise de regressão, testando modelos polinomiais linear e quadrático. Utilizou-se para isso o software SAS[®] Studio, disponível na plataforma SAS OnDemand for Academics (SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Número de vagens por planta

Observa-se tendência de incremento na produção de vagens com o aumento da disponibilidade de ferro até a dose 33,93 mg dm⁻³, considerada assim, o ponto ótimo da dosagem de ferro no solo cujo número médio de vagens por planta foi de 16,90 vagens. Tal comportamento pode ser explicado pela maior disponibilidade do micronutriente, essencial para processos metabólicos como a respiração e a fotossíntese, que contribuem para o desenvolvimento reprodutivo (Taiz; Zeiger, 2017). Contudo, em doses muito elevadas, possivelmente ocorreu efeito fitotóxico, reduzindo a produção. A identificação de um ponto ótimo de adubação é crucial para maximizar a produtividade sem comprometer o crescimento vegetal e o número de vagens, sendo um indicativo direto dessa característica produtiva do feijoeiro Figura 1.

Figura 1 - Número de vagens em plantas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.



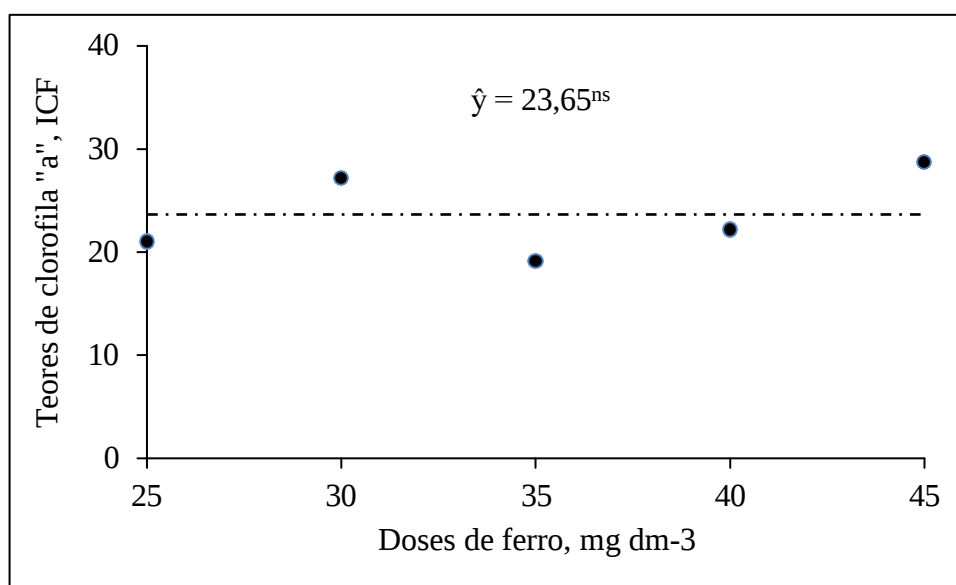
Fonte: Autor, (2025).

A Figura 1 mostra que o número de vagens por planta responde de forma quadrática às doses de ferro aplicadas ao solo. Há um aumento na produção até a dose aproximada de 34 mg dm⁻³, onde se observa o valor máximo de vagens. Isso indica que o ferro, por ser essencial em processos metabólicos como fotossíntese e respiração, favorece o desenvolvimento reprodutivo das plantas. Após esse ponto, o excesso do nutriente causa redução na produção, possivelmente por efeitos tóxicos. A curva evidencia a necessidade de doses equilibradas para maximizar a produtividade. O manejo adequado do ferro é, portanto, fundamental para o bom desempenho do feijoeiro (Lynch, 2011; Stoltzfus, 2011).

4.2 Teores de clorofila “a”

Na Figura 2, pode-se observar os teores de clorofila “a” de plantas de feijão-comum submetidas à adubação radicular com ferro. Os dados indicam não ter havido efeito significativo das doses de ferro para os teores dessa clorofila.

Figura 2 - Teores de clorofila “a” em folhas de plantas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.



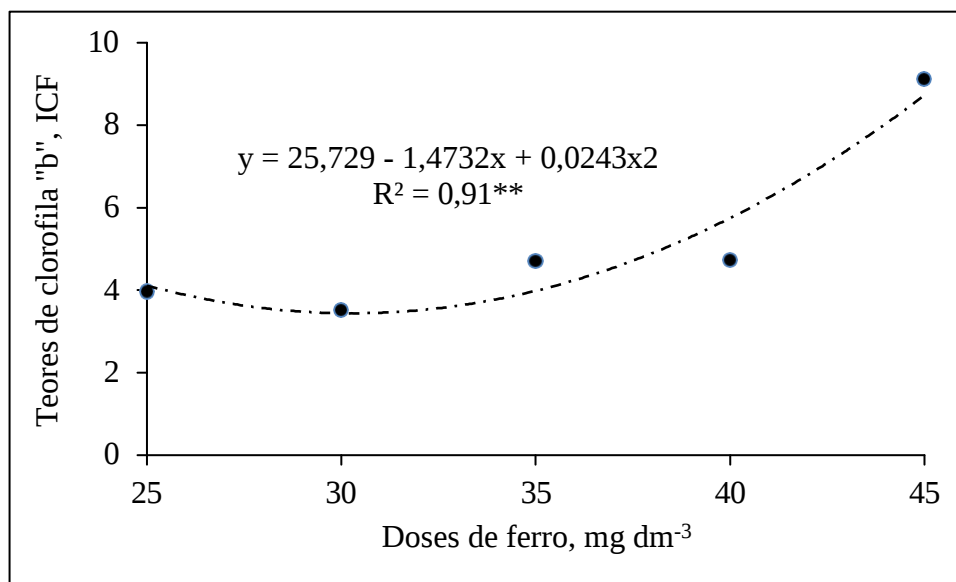
Fonte: Autor, (2025).

O papel do ferro como cofator de enzimas envolvidas na biossíntese de clorofilas e na cadeia de transporte de elétrons nos cloroplastos é de grande importância para as plantas e a clorofila “a” está diretamente relacionada à fotossíntese, sendo o principal pigmento responsável pela captação de luz (Taiz; Zeiger, 2017).

4.3 Teores de clorofila “b”

A resposta aos tratamentos com ferro apresenta padrão de aumento dos teores da clorofila “b” a partir da dose de 30,31 mg dm⁻³ de ferro no solo com valor ICF estimado em 3,4 aumentando para 8,64 ICF na dosagem de 45 mg dm⁻³ ajustando-se ao modelo de regressão quadrática na Figura 3. Tal fato reforça a hipótese de que o aumento da disponibilidade do micronutriente estimula a atividade fotossintética, uma vez que a clorofila “b” atua como pigmento acessório, ampliando o espectro de luz captado e a relação proporcional entre os tipos de clorofila pode indicar a saúde fisiológica da planta e sua capacidade adaptativa frente à variação nutricional do solo.

Figura 3 - Teores de clorofila “b” em folhas de plantas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.



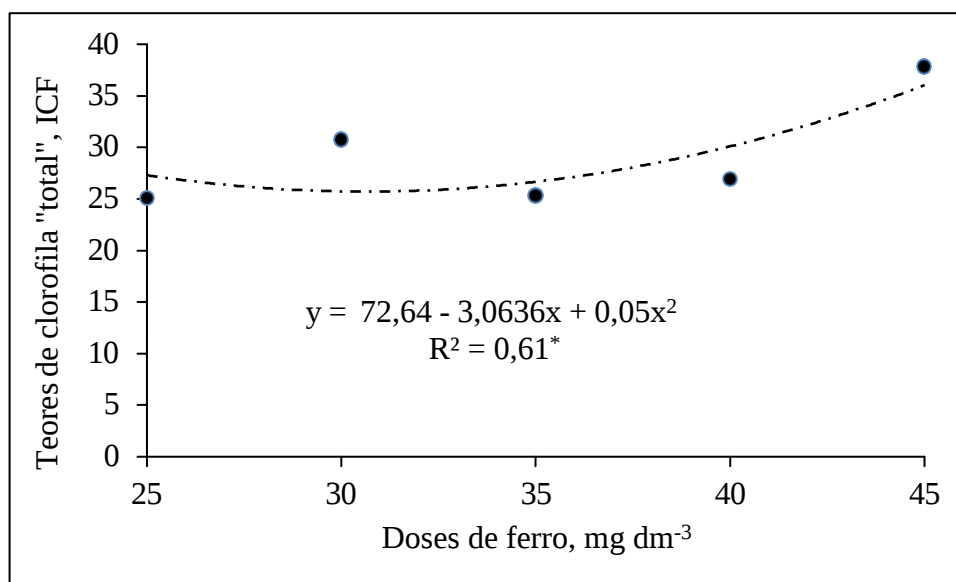
Fonte: Autor, (2025).

A eficiência fotossintética das plantas, fator crucial para o crescimento e a adaptação a diferentes condições ambientais, está diretamente associada ao teor de pigmentos fotossintéticos, como as clorofilas. O teor foliar de clorofila é amplamente utilizado como indicador do potencial fotossintético das plantas, dada sua relação direta com a absorção e a transferência de energia luminosa. Em geral, plantas com maior concentração de clorofila tendem a apresentar taxas mais elevadas de fotossíntese, por possuírem maior capacidade de interceptar fótons por unidade de tempo (Taiz; Zeiger, 2017).

4.4 Teores de clorofila “total”

Somando os teores de clorofila “a” e “b”, a clorofila total serve como indicativo integrado da capacidade fotossintética da planta. Na Figura 4 pode-se verificar que os dados de clorofila “total” se ajustaram ao modelo polinomial quadrático sugerindo que doses intermediárias de ferro (30 a 40 mg dm^{-3}) favorecem a produção de pigmentos, otimizando o desempenho fisiológico da cultura. Entretanto, através da equação de regressão, a maior dose (45 mg dm^{-3}) promoveu uma resposta do feijoeiro de 35,78 ICF. Essa resposta positiva tende a estabilizar ou declinar nas doses mais elevadas, evidenciando que a biofortificação deve ser manejada com critério para evitar efeitos deletérios.

Figura 4 - Teores de clorofila “total” em folhas de plantas de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.



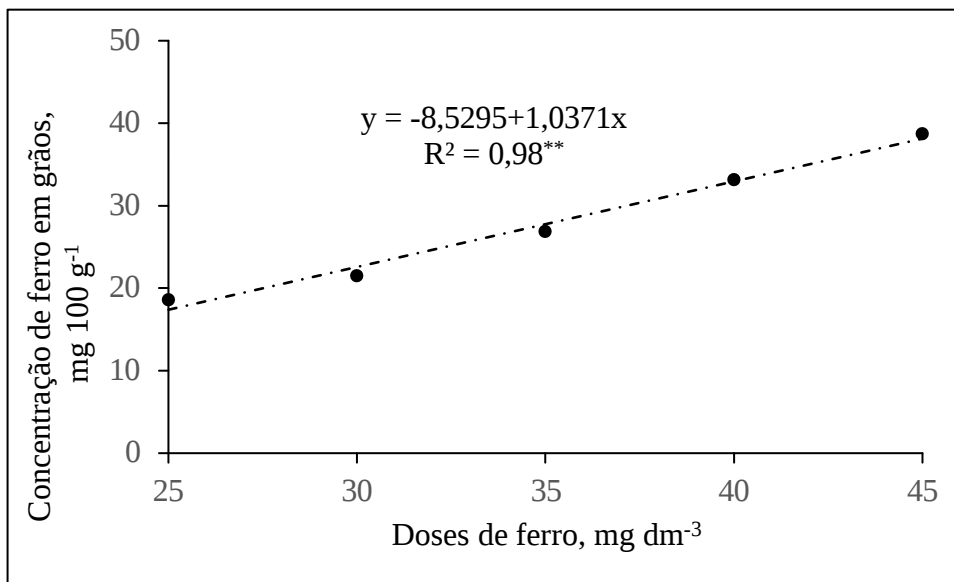
Fonte: Autor, (2025).

A ativação dos processos fotobiológicos nas plantas depende da absorção da radiação luminosa por compostos específicos, denominados pigmentos vegetais. Esses pigmentos são formados por moléculas que apresentam grupos cromofóricos, os quais conferem coloração característica e permitem a captura da luz. Entre os principais pigmentos presentes nos vegetais destacam-se as clorofilas, fitocromos, flavinas, carotenoides e antocianinas. Dentre esses, as clorofilas constituem o grupo mais relevante, por desempenharem papel central na fotossíntese, processo no qual também participam, em menor proporção, alguns carotenoides (Taiz; Zeiger, 2017).

4.5 Concentração de ferro nos grãos

O principal objetivo da biofortificação agrônômica do feijoeiro na presente pesquisa foi de aumentar a concentração de ferro nos tecidos comestíveis da planta, neste caso, os grãos. A Figura 5 indica que há ajuste da equação de regressão para o modelo linear crescente observando correlação positiva entre as doses aplicadas no solo e os teores de ferro nos grãos, até uma dose de saturação. Dos dados ajustados pela equação verifica-se que na dose de 25 mg dm⁻³ (testemunha) o teor de ferro nos grãos foi de 17,39 mg de ferro por 100 g de grãos. Já na maior dose de ferro aplicada (45 mg dm⁻³) a concentração de ferro nos grãos foi de 38,14 mg de ferro em 100 g de grãos, um incremento de 20,75 mg 100 g⁻¹.

Figura 5 - Concentração de ferro em grãos de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) var. crioula crescendo em solo contendo doses crescentes de ferro. Bananeiras-PB, 2025.



Fonte: Autor, (2025).

Este ponto promissor na vista nutricional da saúde pública, podendo contribuir para o combate à anemia ferropriva em populações vulneráveis. No entanto, a eficiência da translocação do ferro até os grãos dependerá também de fatores genéticos da cultivar e das condições edafoclimáticas (Albuquerque; Guedes; Drumond, 2017).

A deficiência de ferro é considerada a carência nutricional de maior prevalência global, afetando cerca de dois bilhões de pessoas e resultando em aproximadamente um milhão de óbitos anuais (Silva; Schieferdecker; Amarante, 2011). Crianças e gestantes estão entre os grupos mais vulneráveis à deficiência de ferro, devido à maior necessidade do nutriente durante o crescimento e a gestação. Essas fases exigem maior aporte de ferro para atender ao desenvolvimento corporal e à formação fetal (Azevedo; Almeida; Szarfarc, 2016).

A biofortificação desponta como uma alternativa promissora, visando ao incremento de nutrientes nas porções comestíveis das culturas agrícolas, seja por técnicas agrônomicas (adubação via solo ou foliar) ou por meio do melhoramento genético (Lovato *et al.*, 2017).

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicam a existência de uma dose ideal de ferro no solo, capaz de promover simultaneamente o aumento da produtividade, a melhoria da eficiência fotossintética e o aprimoramento da qualidade nutricional dos grãos entre 36 mg dm⁻³. Essa dose representa um equilíbrio essencial entre o fornecimento adequado do micronutriente e o desempenho fisiológico e produtivo da planta.

A biofortificação agronômica, quando bem manejada, mostra-se uma estratégia viável para enriquecer o feijão-comum com ferro, sem comprometer o desempenho agronômico da cultura.

Teores de clorofilas "b" e "total" são positivamente influenciados pelas doses de ferro, com destaque para a faixa entre 30 e 40 mg dm⁻³ e a concentração de ferro nos grãos aumenta com a elevação das doses aplicadas no solo.

6 AGRADECIMENTOS

A CAPES. Ao PPGCAG/CCHSA/UFPB. Ao Laboratório de Solos, Ao Laboratório de Cromatografia e Espectrofotometria e ao Laboratório de Físico-Química do CCHSA/UFPB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, N.; HURRELL, R.; KELISHADI, R. Review on iron and its importance for human health. **Journal of Research in Medical Sciences**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 164–174, 2014.

ALBUQUERQUE, C. C. D.; GUEDES, P. A. P.; DRUMOND, M. M. Fitorremediação de áreas contaminadas por rejeito de mineração: avaliação das concentrações de ferro e zinco - Estudo de caso de BENTO RODRIGUES, MARIANA, MG. In: IX SBEA + XV ENEEAMB + III FLES, 2017, Belo Horizonte, Brasil. **Blucher Engineering Proceedings**. Belo Horizonte, Brasil: Editora Blucher, 2017. p. 358–370. Disponível em: <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/26706>. Acesso em: 25 maio 2025.

ALBURQUERQUE, J. A. *et al.* Plant growth responses to biochar amendment of Mediterranean soils deficient in iron and phosphorus. **Journal Of Plant Nutrition and Soil Science**, [s. l.], v. 178, n. 4, p. 567–575, 2015.

AZEVEDO, B. A. R.; ALMEIDA, M. F.; SZARFARC, S. C. Percepção das causas e riscos da anemia de gestantes atendidas em Programa Estratégia de Saúde da Família em São Caetano do Sul (São Paulo). **Segurança Alimentar e Nutricional**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 984, 2016.

BLAIR, M. W.; ET AL. Genetic diversity, inter-gene pool introgression and nutritional quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) from Central Africa. **Theoretical and Applied Genetics**, [s. l.], v. 121, n. 2, p. 237–248, 2010.

BOUIS, H. E.; ET AL. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. **Food and Nutrition Bulletin**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 31–40, 2011.

BROADLEY, M.; ET AL. Beneficial elements. In: MARSCHNER, P. (Ed.). Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, [s. l.], n. 3, p. 249–269, 2012.

CABRAL, L. G. R. **Aspectos da biofortificação em *Phaseolus vulgaris* L.** 2024. 30 f. Manografia - UNESP, SÃO PAULO, 2024.

CHAVES, R. D. Q. *et al.* Arroz com feijão e a promoção da segurança alimentar e nutricional no Brasil. **Contribuciones a las ciencias sociales**, [s. l.], v. 17, n. 12, p. e12366, 2024.

COÊLHO, J. D. FEIJÃO: Produção e mercados. **Caderno Setorial ETENE**, [s. l.], v. 6, n. 197, p. 1–9, 2021.

COLODETE, C. M. Estratégias para biofortificação de ferro em plantas. **Revista observatorio de la economia latino americana**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 1–18, 2024.

CONNORTON, J. M.; BALK, J.; RODRÍGUES-CELMA, J. Iron homeostasis in plant – a brief overview. **Metallomics**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 813–823, 2017.

COSTA, S. M. *et al.* O papel de fungos micorrízicos arbusculares na tolerância do feijão comum ao crômio. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v. 20, n. 2, 2024. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/view/5011. Acesso em: 25 maio 2025.

COSTA, L. S. G. *et al.* Perfil epidemiológico dos pacientes hospitalizados com anemia por deficiência de ferro e a relação da dietoterapia no prognóstico da doença. **Revista foco**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. e2713, 2023.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. **rev. e atual**, [s. l.], n. 3, p. 577, 2017.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. **Revista e Ampliada**, [s. l.], p. 355, 2018.

FALKER®. ClorofiLOG, medidor digital de teor de clorofila em folhas de plantas. **FALKER**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.falker.com.br/br/clorofilog>. Acesso em: 25 abr. 2025.

FIGUEIREDO, M. A. D. **Biofortificação com zinco, selênio e ferro, e biodisponibilidade de ferro em cultivares de feijoeiro-comum**. 2016. 137 f. Tese - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2016.

HASELWANDTER, K. *et al.* Siderophores in plant root tissue: tagetes patula nana colonized by the arbuscular mycorrhizal fungus Gigaspora margarita. **Biometals**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 137–146, 2020.

HENRIQUES, G. S. *et al.* Estado nutricional e qualidade da dieta de pré-escolares e escolares de uma área socioeconomicamente vulnerável / Nutritional status and dietary quality among preschool and school children from a socioeconomically vulnerable area. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 9972–9991, 2022.

IBGE. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2024. Disponível em: <http://sidra.ibge.gov.br/home/Ispa/brasil>. Acesso em: 14 abr. 2025.

IBGE. Produção agropecuária: feijão. In: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producaoagropecuaria/feijao/br>. Acesso em: 2 set. 2024.

JUCOSKI, G. D. O. *et al.* Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciência Agronômica**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 720–728, 2016.

KOK, A. D. X. *et al.* Iron biofortification of rice: progress and prospects. In: Rice Crop - Current Developments. Eds.; Shah F, Khan ZH, Iqbal A. **IntechOpen**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 25–44, 2018.

LACERDA, E. G. *et al.* Adubação nitrogenada no vigor das mudas, concentração de aminoácidos e proteínas totais e no teor de clorofila no feijão-de-corda (*Vigna Unguiculata*). **Agri-environmental sciences**, [s. l.], v. 6, p. 11, 2020.

LOVATO, F. *et al.* Composição centesimal e conteúdo mineral de diferentes cultivares de feijão biofortificado (*Phaseolus vulgaris* L.). **Brazilian Journal of Food Technology**, [s. l.], v. 21, n. 0, 2017c. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1981-67232018000100418&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 13 maio 2025.

LUCENA, J. J.; HERNANDEZ-APAOLAZZA, L. Iron nutrition in plants: an overview. **Plant Soil**, [s. l.], v. 418, n. 1, p. 1–4, 2017.

LYNCH, S. R. Why Nutritional iron deficiency persists as a worldwide problem. **The Journal of Nutrition**, [s. l.], v. 141, n. 4, p. 763–768, 2011.

MATOS, R. M. D. *et al.* Caracterização e aptidão climática de culturas para o município de Alhandra - Pb, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 183–192, 2015.

MEDEIROS, R. M. D.; CAVALCANTI, E. P.; DUARTE, J. F. D. M. Classificação climática de köppen para o estado do piauí – brasil. **Revista equador**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 82–99, 2020.

MOLNÁR, Z. *et al.* Understanding the Mechanisms of Fe Deficiency in the Rizosphere to Promote Plant Resilience. **Plants**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 19–45, 2023.

NOVA, P. C. C. V. *et al.* Avaliação de método convencional e digestão úmida para determinação de níveis de Fe, Mn, Ni, Cu, Co, Mg, Zn, Ca, Mo e Se em amostras secas de tomates orgânicos (*Solanum lycopersicum* L.) por Absorção Atômica de Chama (FAAS). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 159–165, 2012.

RAHMAN, A. *et al.* Arbuscular mycorrhizal symbiosis mitigates iron (Fe)-deficiency retardation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) through the enhancement of Fe accumulation and sulfur-assisted antioxidant defense. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 21, n. 6, p. 19–22, 2020.

RAMZANI, P. M. A. *et al.* Iron biofortification of wheat grains through integrated use of organic and chemical fertilizers in pH affected calcareous soil. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 104, n. 1, p. 284–293, 2016.

RIBEIRO, N. D. *et al.* Composição de microminerais em cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético. **Bragantia**, [s. l.], v. 67, n. 2, p. 267–273, 2008.

RONKO, L. Z. *et al.* Caracterização físico-química de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) e das propriedades tecnológicas de sua fração amido. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2021. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/view/12699>. Acesso em: 13 maio 2025.

ROSA, T. F. *et al.* Efeitos de fontes e doses de selênio na produtividade e qualidade de grãos de feijão. **Observatório de la economía latinoamericana**, [s. l.], v. 22, n. 6, p. e5270, 2024.

ROUT, G. R.; SAHOO, S. Role of iron in plant growt and metabolismo. **Reviews in Agricultural Science**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 1–24, 2015.

SANTOS, R. S. *et al.* Dealing with iron metabolism in rice: from breeding for stress tolerance to biofortification. **Genetics And Molecular Biology**, [s. l.], v. 40, n. 11, p. 312–325, 2017.

SCHMIDT, F. *et al.* Impacto do manejo da água na toxidez por ferro no arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 1226–1235, 2013.

SILVA, O. F. da *et al.* Impacto econômico da nova cultivar de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) BRS FP403 no sul do BRASIL. **61º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**, Piracicaba, 2023. p. 1–5.

SILVA, A. F. D.; SCHIEFERDECKER, M. E. M.; AMARANTE, H. M. B. D. S. Ingestão alimentar em pacientes com doença inflamatória intestinal. **ABCD. Arquivos Brasileiros de Cirurgia Digestiva (São Paulo)**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 204–209, 2011.

SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 227–250, 2011.

STOLTZFUS, R. J. Iron interventions for women and children in low-income countries. **The Journal of Nutrition**, [s. l.], v. 141, n. 4, p. 756–762, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. [S. l.]: Artmed, 2017.

TALUKDER, Z. I. *et al.* Genetic diversity and selection of genotypes to enhance Zn and Fe content in common bean. **Canadian Journal of Plant Science**, [s. l.], v. 90, n. 1, p. 49–60, 2010.

VASQUES, V. V. *et al.* Resíduo da Mineração de Calcário Laminado na Correção da Acidez do Solo e na Nutrição do Feijoeiro. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s. l.], v. 43, n. 2, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/37219>. Acesso em: 13 maio 2025.

WINKELMANN, G. A search for glomuferrin: a potential siderophore of arbuscular mycorrhizal fungi of the genus *Glomus*. **BioMetals**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 559–564, 2017.

Emitido em 02/06/2025

MONOGRAFIA Nº 1/2025 - CCHSA - CCCA (11.01.24.17)
(Nº do Documento: 1)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 03/06/2025 15:37)
LEANDRO RIOS ANDRADE
ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO
3152105

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufpb.br/documentos/> informando seu número: **1**,
ano: **2025**, documento (espécie): **MONOGRAFIA**, data de emissão: **03/06/2025** e o código de verificação:
68d2eb83f1