

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA

Luiz Guilherme Ramalho Cabral

ASPECTOS DA BIOFORTIFICAÇÃO EM *Phaseolus vulgaris* L.

Dracena

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA

Luiz Guilherme Ramalho Cabral

ASPECTOS DA BIOFORTIFICAÇÃO EM *Phaseolus vulgaris* L.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Tecnológicas – Unesp, Câmpus
de Dracena como parte das exigências
para graduação em Engenharia
Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz

Dracena

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Aspectos da biofortificação em *Phaseolus vulgaris* L.

Modalidade: Trabalho de **revisão bibliográfica com análise crítica**.

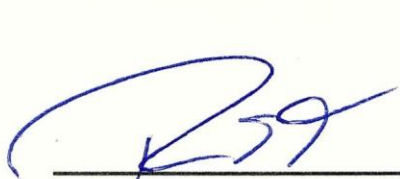
Autor: Luiz Guilherme Ramalho Cabral

Orientador (a): Dr. Rafael Simões Tomaz

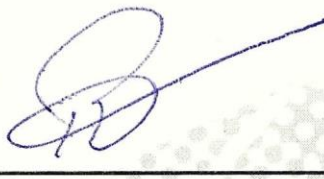
Co-orientador(es):

Número de Créditos: 12

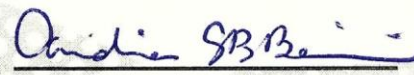
Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 08/11/2024



Dr. Rafael Simões Tomaz



Dr. Reges Heinrichs



Dra. Carolina dos Santos
Batista Bonini

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me guiado e sustentado ao longo de toda essa trajetória, me concedendo forças e perseverança nos momentos mais desafiadores. À minha família, que sempre esteve ao meu lado, ofereça minha gratidão pelo apoio e pela presença constante, que foram essenciais para a realização desse sonho.

Agradeço, especialmente, à minha namorada, por acreditar em mim em cada etapa desse caminho, me incentivando a superar os obstáculos e celebrando comigo cada conquista. Sua parceria e compreensão foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Manifesto também minha sincera gratidão a todos os professores que, ao longo dessa jornada, contribuíram com o desenvolvimento do meu senso crítico e compartilharam comigo seu conhecimento e experiência. Em especial, ao Prof. Dr. Rafael Simões Tomaz, meu orientador, por seu acompanhamento atento, sua orientação paciente e por todo o apoio e ensinamentos ao longo desse percurso.

RESUMO

Esta revisão bibliográfica investiga a biofortificação do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) como uma estratégia crucial para melhorar sua qualidade nutricional, especialmente no combate à deficiência de micronutrientes, como ferro e zinco, na dieta da população. Apesar de sua promissora aplicação, a biofortificação enfrenta grandes desafios, como: necessidade de equilibrar altos teores de micronutrientes com características agronômicas desejáveis, incluindo produtividade e aceitação pelo consumidor; variabilidade genética dos genótipos de feijão, aliada a práticas de manejo adequadas; disponibilidade de micronutrientes no solo influenciada por diversos fatores, como o pH; adubação com micronutrientes, cuja eficácia depende do entendimento das características do solo e da implementação de boas práticas agronômicas. Ademais, compostos antinutricionais presentes no feijão, como o ácido fítico, podem diminuir a biodisponibilidade de ferro e zinco, representando um desafio adicional para a biofortificação. Esta revisão de literatura foi realizada com base em análises de artigos científicos, livros, documentos técnicos e fontes de sites especializados, utilizando palavras-chave como: "biofortificação", "feijão comum", "*Phaseolus vulgaris*", "biofortificação com ferro e zinco", "desafios da biofortificação" e "influência de fatores ambientais". A partir dos dados adquiridos, foram selecionados estudos e informações relevantes que abordam os aspectos nutricionais, agronômicos e ambientais da biofortificação do feijão, com ênfase nas estratégias de aumento de ferro e zinco e nas limitações do processo. A ausência de regulamentação e certificação para produtos biofortificados no Brasil limita a valorização desse alimento no mercado, o que dificulta a motivação dos agricultores para aumentar os teores de micronutrientes em seus grãos. Este trabalho ressalta a importância de políticas públicas que incentivem a produção e o consumo de alimentos biofortificados, contribuindo assim para a segurança alimentar e a melhoria da saúde nutricional da população.

Palavras-Chave: Biofortificação; *Phaseolus vulgaris* L.; ferro e zinco; compostos antinutricionais e práticas agronômicas.

ABSTRACT

This bibliographic review investigates the biofortification of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a crucial strategy to enhance their nutritional quality, particularly in combating micronutrient deficiencies such as iron and zinc in the population's diet. Despite its promising application, biofortification faces significant challenges, such as the need to balance high micronutrient content with desirable agronomic traits, including productivity and consumer acceptance; genetic variability of bean genotypes combined with appropriate management practices; availability of soil micronutrients influenced by various factors, such as pH; and micronutrient fertilization, whose effectiveness depends on understanding soil characteristics and implementing good agronomic practices. Furthermore, antinutritional compounds present in beans, such as phytic acid, can reduce the bioavailability of iron and zinc, posing an additional challenge to biofortification. This literature review was based on analyses of scientific articles, books, technical documents, and specialized website sources, using keywords such as "biofortification," "common beans," "*Phaseolus vulgaris*," "iron and zinc biofortification," "biofortification challenges," and "influence of environmental factors." From the data collected, relevant studies and information addressing the nutritional, agronomic, and environmental aspects of bean biofortification were selected, emphasizing strategies for increasing iron and zinc content and the limitations of the process. The absence of regulation and certification for biofortified products in Brazil limits the market value of these foods, making it difficult to motivate farmers to increase micronutrient levels in their grains. This study highlights the importance of public policies that encourage the production and consumption of biofortified foods, thereby contributing to food security and improving the population's nutritional health.

Keywords: Biofortification; *Phaseolus vulgaris* L.; iron and zinc; antinutritional compounds; agronomic practices.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO GERAL.....	10
2.1 Objetivos específicos	10
3. REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1 Feijão comum, panorama brasileiro.....	11
3.2 Deficiências nutricionais de ferro e zinco.....	14
3.3 Aspectos Nutricionais do <i>Phaseolus vulgaris</i>	19
3.4 Biofortificação do feijoeiro	23
3.5. Disponibilidade de ferro e zinco no solo	29
3.6 Desafios e limitações	32
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5. REFERÊNCIAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) é um dos alimentos mais importantes na alimentação brasileira. De acordo com Silva et al. (2022), o consumo médio per capita de feijão comum foi de 12,2 kg por habitante. Com uma produção em 2022 de 2,84 milhões de toneladas, trata-se de um alimento básico na dieta diária, seja por sua acessibilidade, ou por ser uma excelente fonte de proteínas, além de boas concentrações de vitaminas e minerais. O Brasil é o segundo maior produtor de feijão do mundo, com uma produção que corresponde a aproximadamente dez por cento da produção global (FAOSTAT, 2022; Los et al., 2018).

De acordo com Chávez-Servia et al. (2016), os grãos dessa leguminosa ganham cada vez mais espaço na alimentação de diversos países, principalmente devido à rica variedade de nutrientes essenciais para a saúde humana. Muitos deles estão associados a efeitos preventivos contra doenças cardiovasculares e degenerativas (Chávez-Servia et al., 2016). Além disso, de acordo com a FAO (2023), 9,2% da população mundial se encontra em estado de subnutrição, o que reforça a necessidade e a importância da introdução de alimentos nutritivos, acessíveis e de qualidade.

A desnutrição é decorrente da ingestão inadequada de alimentos em quantidade ou qualidade. As deficiências por micronutrientes estão entre os problemas nutricionais mais comuns, caracterizadas pela falta de vitaminas e minerais essenciais. As deficiências de ferro e zinco estão entre as principais causas da desnutrição por micronutrientes no mundo (Diaz et al., 2022; Santos et al., 2024). Em contrapartida, Cardoso et al. (2024) destacam que estudos estão sendo desenvolvidos com o objetivo de aumentar o teor de micronutrientes em diversas culturas agrícolas, um processo conhecido como biofortificação, que envolve a utilização de uma ou mais práticas, visando incrementar a concentração de micronutrientes essenciais.

O sucesso da biofortificação de uma cultura está intimamente relacionado a aspectos da ciência do solo. O acúmulo de micronutrientes de

interesse está limitado pelo fornecimento e a disponibilidade desses elementos, bem como pela capacidade da cultura em explorar o solo. Existem, também, as limitações relacionadas ao manejo do solo, nos quais altos níveis de pH dificultam a disponibilidade de Fe e Zn (White e Broadley, 2009). Estratégias como a aplicação de fertilizantes quelatados e a correção do pH do solo podem ser necessárias para otimizar a absorção desses micronutrientes pelas plantas (International Fertilizer Association, 2020).

A biofortificação do feijão comum possui barreiras que envolvem aspectos tanto agronômicos quanto nutricionais. Um dos principais desafios diz respeito à associação de que quanto maior a concentração de ferro no feijão, maior será sua absorção no corpo humano (Glahn e Noh, 2021). Outro desafio está relacionado à absorção de micronutrientes. A presença de compostos antinutricionais pode interferir na biodisponibilidade de ferro e zinco, dificultando os benefícios esperados da biofortificação (Kumar & Sinha, 2018). Por fim, uma das maiores implicações está relacionado à regulamentação incipiente sobre culturas biofortificadas.

Esta revisão de literatura foi realizada com base em análises de artigos científicos, livros, documentos técnicos e fontes de sites especializados, utilizando para tanto, palavras-chave, como: 'biofortificação', 'feijão comum', '*Phaseolus vulgaris*', 'biofortificação com ferro e zinco', 'desafios da biofortificação' e 'influência de fatores ambientais'. A partir dos dados adquiridos foram selecionados estudos e informações relevantes que abordam os aspectos nutricionais, agronômicos e ambientais da biofortificação do feijão, com ênfase nas estratégias de aumento de micronutrientes de ferro e zinco e nas limitações do processo.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é investigar os principais desafios e oportunidades envolvidos na biofortificação agronômica de *Phaseolus vulgaris* L. com ferro e zinco. O estudo busca explorar a relação entre a biofortificação e a exigência e disponibilidade desses nutrientes, analisar o impacto dos compostos antinutricionais na biodisponibilidade desses micronutrientes e avaliar os fatores que limitam o sucesso dessa estratégia.

2.1 Objetivos específicos

- Analisar a relação entre a biofortificação e a exigência e disponibilidade de ferro e zinco no feijão comum;
- Avaliar o impacto de compostos antinutricionais na biodisponibilidade de micronutrientes no feijão;
- Identificar os fatores ambientais e agronômicos que limitam ou favorecem o sucesso da biofortificação;
- Discutir os desafios associados à biofortificação do feijão comum.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Feijão comum, panorama brasileiro

A produção de *P. vulgaris*, é realizada em diversas regiões do país, devido sua ampla adaptação edafoclimática, o que permite seu cultivo durante todo o ano em diferentes estados do país. Sua semeadura ocorre em três épocas distintas: “safra das águas” (1º safra), “safra da seca” (2º safra) e “safra de inverno” (3º safra). O feijão das “águas” é cultivado nos meses de outubro a dezembro e é marcado pelo plantio e colheita favorecidos pela alta precipitação. O Feijão da “seca” é cultivado entre os meses de janeiro a fevereiro, durante um período de baixa precipitação. O Feijão de “inverno” é cultivado entre os meses de abril a julho e seu cultivo deve ser feito com uso de irrigação (Silva et al., 2022). Vale ressaltar que esse calendário é impreciso quando se pretende aplicar a todo território nacional e depende diretamente da região em que se considera instalar essa cultura.

Na Tabela 1 estão os dados de produção, produtividade e área para o feijão comum das safras de 22/23, 23/24 e 24/25. A análise das três safras de feijão revela variações na área, produção e produtividade ao longo dos anos. A 1ª safra (águas) teve um leve aumento na área cultivada, crescendo 0,44% entre 22/23 e 23/24 e 2,35% entre 23/24 e 24/25. Contudo, sua produção caiu -1,50% entre 22/23 e 23/24, com uma leve recuperação de 0,53% no ano seguinte, enquanto a produtividade diminuiu gradualmente (-2,01% e -1,74%).

A 2ª safra (seca) destacou-se com uma expansão significativa na área (+15,23% entre 22/23 e 23/24), mas uma leve retração (-1,37%) em 24/25. A produção aumentou consideravelmente (+18,96%), mas desacelerou para 1,46% no último ano. A produtividade, apesar de uma queda inicial (-2,01%), mostrou recuperação (+2,83%).

Por outro lado, a 3ª safra (irrigada) apresentou uma queda expressiva na área cultivada (-9,20% entre 22/23 e 23/24), mas voltou a crescer 4,82% em 24/25. A produção acompanhou essa dinâmica, com quedas sucessivas de -2,98% e -1,47%. A produtividade teve um aumento inicial (+6,99%), mas sofreu

uma queda acentuada de -6,06% em 24/25. Essas oscilações refletem desafios específicos no manejo das safras irrigadas.

Tabela 1 - Comparativo entre área, produção e produtividade de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). (22/23 – 24/25).

Safr	1ª Safra (águas)			2ª Safra (seca)			3ª Safra (irrigado)		
	Área (ha)	Produção (t)	Produt. (kg/ha)	Área (ha)	Produção (t)	Produt. (kg/ha)	Área (ha)	Produção (t)	Produt. (kg/ha)
22/23	857.300	956.700	1.116	1.326.200	1.271.200	963	516.400	813.000	1.574
23/24	861.100	942.300	1.094	1.528.200	1.512.200	990	468.900	789.500	1.684
Var. %	0,44	-1,50	-2,01	15,23	18,96	2,80	-9,20	-2,98	6,99
23/24	861.100	942.300	1.094	1.528.200	1.512.200	990	468.900	789.500	1.684
24/25	881.300	947.300	1.075	1.507.300	1.534.300	1.018	491.500	777.900	1.582
Var. %	2,35	0,53	-1,74	-1,37	1,46	2,83	4,82	-1,47	-6,06

Fonte: Adaptado de Conab (2024).

No Brasil, segundo dados divulgados pelo IBGE (Tabela 2), os principais estados produtores dessa cultura no ano de 2023 foram Paraná, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e São Paulo, com participações de 24%, 20%, 12%, 10% e 8%, respectivamente. No Paraná, o município de Irati se destacou como o maior produtor do estado. A região de maior destaque é o Sul, contribuindo com cerca de 29% da produção nacional. A região com a maior área ocupada pela cultura é o Nordeste, entretanto, possui a segunda menor participação da produção nacional entre as outras regiões, contribuindo com 13,9% do total produzido, sua baixa produtividade é consequência do baixo nível de tecnificação, associada ao tipo de agricultura familiar predominante nessa região. De acordo com Coêlho (2021), geralmente o produtor familiar produz com baixa tecnificação pela falta de capital e pela produção em consórcio com outras culturas.

Tabela 2 - Área, produtividade e produção nacionais de feijão total, por regiões na safra de 2023.

Região	Área (ha)	Produtividade (kg/ha)	Produção (t)
Centro-Oeste	313.978	2.283	712.137
Nordeste	1.145.907	432.89	404.580
Norte	90.636	1.027	106.554
Sudeste	392.050	1.922	809.122
Sul	522.651	1.675	866.650
Brasil	2.465.222	1.176	2.899.043

Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

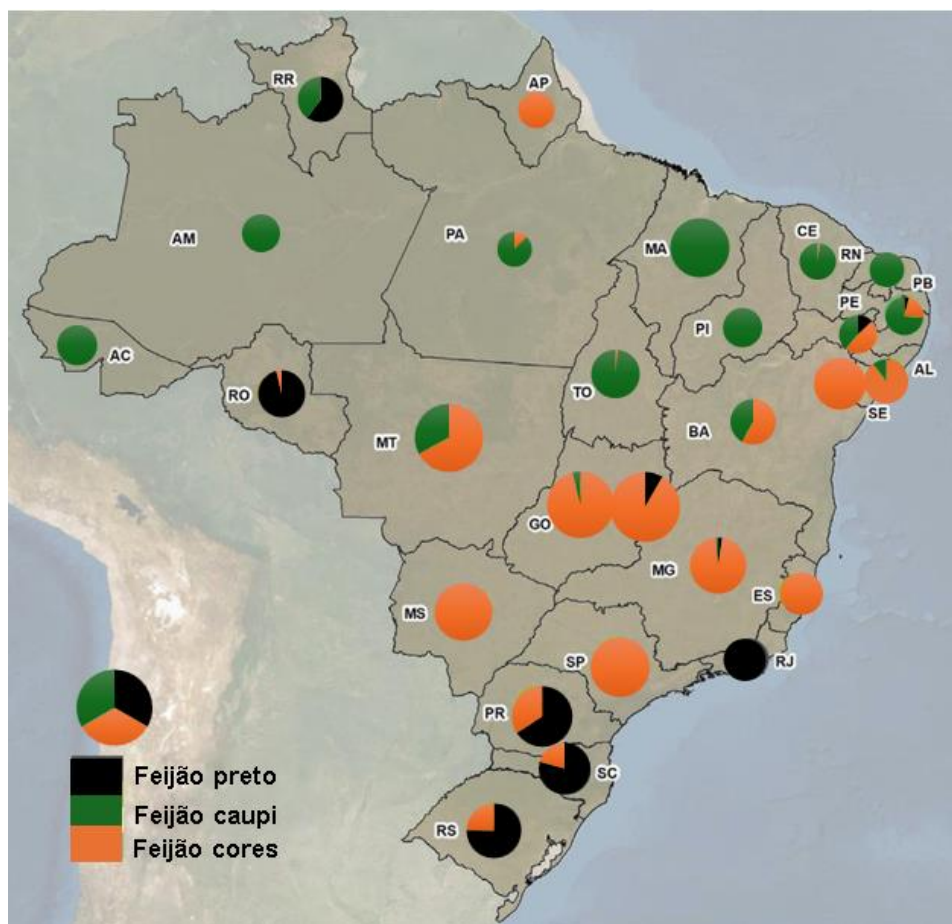
Além disso, a baixa produtividade pode ser explicada, devido a fatores tais como ausência de calagem, solo erodido ou em processo de erosão, adubação desequilibrada ou ainda a fatores como manejo inadequado de pragas e doenças (Coêlho, 2021). A região com maior produtividade é o Centro-Oeste, onde predomina a agricultura não familiar, visando altos rendimentos por meio da adoção de boas práticas e emprego de tecnologias disponíveis, tendo uma agricultura familiar pouco expressiva para esta cultura (Maciel e Bezerra, 2023).

No Brasil, os cultivares de feijão são classificados de acordo com a cor dos grãos, que por sua vez podem ser “colorido” (feijão carioca, feijão jalo, feijão rosa, feijão mulato, feijão roxo, feijão vermelho etc.) ou “preto”, sendo que ambos pertencentes a espécie *Phaseolus vulgaris*. O grupo “colorido” é responsável por grande parte da produção nacional, sendo o Centro-Sul a principal região produtora, enquanto a produção do feijão preto concentra-se na região Sul, seguindo do feijão caupi (*Vigna unguiculata*) produzido nas regiões Nordeste e Norte do país (Umeda, 2017). No grupo “cor”, há clara prevalência do feijão carioca, que é produzido em quase todo o território nacional. Na Figura 1, está apresentada uma distribuição dos principais tipos de feijão produzidos por estado na safra de 24/25.

O cultivar carioca ganhou destaque a partir da década de 1960, quando uma mutação no feijão-chumbinho produziu um novo cultivar com grãos de coloração bege e listras marrons. O novo material apresentava alto rendimento, resistência a doenças e rápido cozimento, ganhando rapidamente a preferência

pelo consumidor (Chiorato et al., 2018). Segundo o Instituto Brasileiro de Feijão (IBRAFE), entre os feijões consumidos no Brasil, 80% são de Feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) e 20% são de Feijão-caupi (*Vigna unguiculata*). O Feijão-comum consumido no Brasil, por sua vez, está assim distribuído: 56% carioca, 21% preto e 3% especiais.

Figura 1 - Distribuição da quantidade produzida de feijão preto, feijão caupi e feijão cores (em mil toneladas), por estado (safra de 2024/25).



Fonte: Adaptado de CONAB (2024).

3.2 Deficiências nutricionais de ferro e zinco

De acordo com a Tabela 3, os seres humanos precisam de aproximadamente 40 nutrientes em quantidades adequadas para manter suas vidas saudáveis e produtivas. Esses nutrientes podem ser classificados em duas categorias: essenciais e não essenciais. Enquanto os nutrientes essenciais devem ser obtidos a partir dos alimentos, pois o corpo humano não pode produzi-

los, os não essenciais não requerem consumo direto de alimentos, já que o corpo pode sintetizá-los.

Os nutrientes podem ainda ser classificados como macronutrientes, que são exigidos em maior quantidade (sódio, potássio, magnésio, enxofre, fósforo, cloro e cálcio) ou em micronutrientes, que são exigidos em pequenas quantidades (ferro, zinco, cobre, manganês, iodo, selênio, molibdênio, cobalto e níquel). Coletivamente, esses nutrientes desempenham funções no corpo humano, regulando nosso desenvolvimento físico e mental (Garg et al., 2018; Baum et al., 2024).

Tabela 3 - Ilustração de micro e macronutrientes necessários para a saúde humana.

Micronutrientes		Macronutrientes		
Microminerais	Vitaminas	Aminoácidos (essenciais)	Ácidos Graxos (essenciais)	Macrominerais
Fe	A	Histidina	Ácido linoleico	K
Zn	D	Isoleucina	Ácido alfa- linolênico	Ca
Cu	E	Leucina		Mg
Mn	K	Lisina		S
I	C	Metionina		P
Se	B1	Fenilalanina		Na
Mo	B2	Treonina		Cl
Co	B3	Triptofano		
Ni	B5	Valina		
	B6			
	B7			
	B9			
	B12			

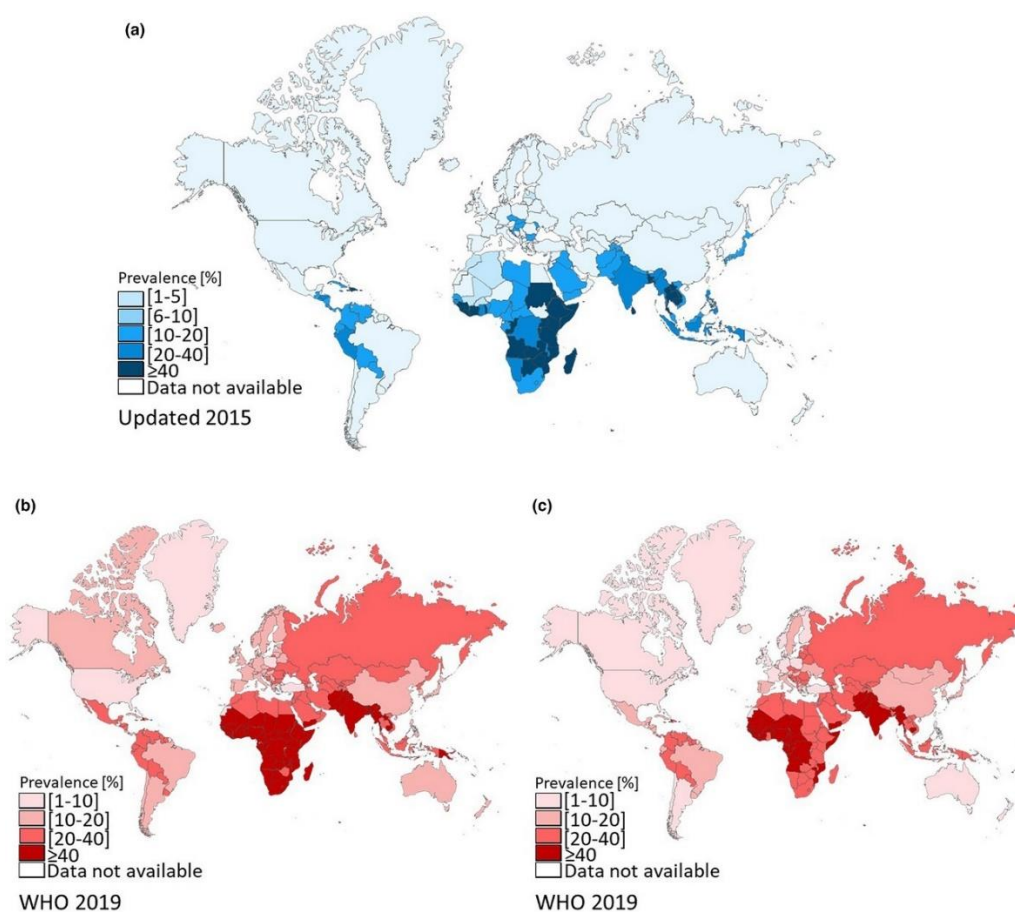
Fonte: Garg et al. (2018).

Para os humanos, os produtos agrícolas são a principal fonte de nutrientes, especialmente para países em desenvolvimento, onde prevalece a dieta baseada em cereais, que tendem a não fornecer as quantidades necessárias de ingestão diária recomendada (Garg et al., 2018; Jha et al., 2020). A fome oculta é uma forma de desnutrição crônica que ocorre quando um

indivíduo, apesar de ter acesso a alimentação regular, não consegue atingir a exigência de macro e/ou micronutrientes do organismo.

Essa forma de desnutrição atinge, principalmente, populações de países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, como o Brasil (Junior et al., 2017). Segundo relatório publicado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), no ano de 2022, cerca de 148 milhões de crianças com menos de 5 anos em todo o mundo se encontravam afetadas por desnutrição crônica, além disso, estima-se fome oculta atinge cerca de 22,3% da população mundial (Figura 2), enquanto a desnutrição aguda afeta 6,8%. A anemia é definida pela OMS (2008) como a condição na qual o conteúdo de hemoglobina no sangue está abaixo do normal como resultado da carência de um ou mais nutrientes essenciais (ferro, zinco, vitamina B12, aminoácidos etc.).

Figura 2 - Mapa mundial mostrando a prevalência de deficiências de ferro e zinco como a porcentagem da população com ingestões abaixo dos requisitos fisiológicos para cada país. (a) Prevalência de deficiência de zinco. (b) Prevalência de anemia associada principalmente à deficiência de ferro entre crianças em idade pré-escolar (6–59 meses). (c) Prevalência de anemia entre mulheres em idade reprodutiva (15–49 anos).



Fonte: Adaptado de Huertas et al. (2022).

De acordo com Gerber (2023), no manual publicado pela farmacêutica Merck Sharpe & Dohme, o ferro é eficientemente absorvido quando o alimento contém ferro-heme (presente nas carnes), não sofrendo nenhuma influência de fatores dietéticos, ao contrário do ferro não heme, presente nos vegetais, que sofre influência de diversos compostos alimentares que reduzem sua absorção. Para uma dieta, é recomendado uma alimentação que forneça 8mg de ferro/ dia para homens adultos e 18mg de ferro/ dia para mulheres adultas (Tabela 4).

O zinco é o segundo micronutriente em maior quantidade no corpo humano, ficando atrás somente do ferro. Grande parte do zinco consumido na dieta não é absorvida, sendo que, uma dieta rica em fibras e fitato reduz a absorção de zinco. A deficiência de zinco surge em função da deficiência alimentar, sendo mais comum em populações que possuem acesso restrito a dietas equilibradas. Além disso, a presença de compostos quelantes nos alimentos, distúrbios no processo de absorção gastrointestinal ou aumento na excreção urinária também são as principais causas de deficiência de zinco, afetando em maior quantidade pessoas idosas, gestantes e crianças. A Tabela 4 apresenta as recomendações diárias de ingestão do zinco, sendo de 11mg/dia para homens e 8 mg/dia para mulheres adultas (Johnson, 2023; Cruz & Soares, 2011).

Tabela 4 - Dose Diária Recomendada (DDR) de Ferro e Zinco.

Exigência diária de ferro				
Idade	Macho	Fêmea	Gravidez	Lactação
Até 6 meses	0,27 mg	0,27 mg	-	-
7–12 meses	11 mg	11 mg	-	-
1–3 anos	7 mg	7 mg	-	-
4–8 anos	10 mg	10 mg	-	-
9–13 anos	8 mg	8 mg	-	-
14–18 anos	11 mg	15 mg	27 mg	10 mg
19–50 anos	8 mg	18 mg	27 mg	9 mg
Exigência diária de zinco				
Idade	Macho	Fêmea	Gravidez	Lactação
Até 6 meses	2 mg	2 mg	-	-
7–12 meses	3 mg	3 mg	-	-
1–3 anos	3 mg	3 mg	-	-
4–8 anos	5 mg	5 mg	-	-
9–13 anos	8 mg	8 mg	-	-
14–18 anos	11 mg	9 mg	12 mg	13 mg
19-50 anos	11 mg	8 mg	11 mg	12 mg

Fonte: Adaptado de National Institutes of Health (2022, 2024).

A busca por uma alimentação balanceada é fundamental para a manutenção da saúde, uma vez que o acesso restrito a alimentação equilibrada pode levar a condições como a anemia (Cavalcante et al., 2020; Yamagishi et al., 2017). Dentre os alimentos frequentemente presentes na nutrição humana, o feijão comum se destaca pelo alto valor nutricional (Vidak et al., 2023). Portanto, compreender os aspectos nutricionais do feijão é crucial para atender às recomendações diárias de ingestão de nutrientes e combater deficiências que podem impactar a qualidade de vida da população.

3.3 Aspectos Nutricionais do *Phaseolus vulgaris*

O feijão-comum é um alimento amplamente consumido no Brasil, de acordo com a Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018 realizada pelo IBGE, a média de ingestão diária per capita de feijão é de 142,2 g, tendo atingido, em 2021, uma média per capita anual de 12,2 kg (Silva, 2023). Sua presença na dieta brasileira está fortemente ligada ao seu elevado valor nutricional, fornecendo de 10 a 20% dos nutrientes necessários para um adulto (Bonett et al., 2007). Quando combinado com o arroz, esse alimento oferece uma excelente fonte de proteínas, pois o feijão contribui com aminoácidos sulfurados, enquanto o arroz complementa com lisina, formando um prato nutricionalmente equilibrado, que proporciona ao organismo todos os aminoácidos essenciais necessários, podendo substituir fontes de proteína animal (Mesquita, 2007).

A composição centesimal do feijão comum (Tabela 5) revela que este alimento é uma fonte significativa de nutrientes essenciais, sendo composto principalmente por água, proteínas (20 a 24%), carboidratos (60 a 65%) cujo principal componente é o amido e fibras (3 a 7%) (Bassinello, 2009). De acordo com os dados da tabela e com a literatura, a quantidade de proteína de base seca está de acordo com os dados reportados por Bassinello (2009), que indicam uma variação de 23,9 a 29,8%, evidenciando o alto teor de proteína dessa leguminosa. Entretanto, quando consumido isoladamente, pode ter baixo valor biológico, devido à baixa digestibilidade e teor de aminoácidos sulfurados (Rámirez-Cárdenas et al., 2008).

O teor de lipídio total apresentado está consistente com o reportado por Celmeli et al. (2018), que encontrou concentrações que variaram de 0,33% a 1,33% em diferentes cultivares, o que possibilita o desenvolvimento de produtos à base de feijão rico em proteínas e com baixo teor de gordura (Marquezi, 2013). O teor de ferro e zinco encontrado na tabela indica valores próximos comparados ao de 6,02 mg Fe/100 g feijão cru e 4,26 mg Zn/100 g feijão cru, segundo Umeda (2017). Melo e Paixão (2020), no entanto, reportaram um teor de ferro menor, na concentração de ferro de 2,63 mg Fe/100 g feijão cru.

A composição centesimal pode diferir de acordo com diferentes genótipos de feijão, práticas de cultivo e condições de cultivo, apresentando variações tanto em características agronômicas, como: produtividade, altura de plantas e peso de cem grãos, quanto em sua composição nutricional, como: teores de proteínas, carboidratos e macro e micronutrientes (Karavida et al., 2022; Tefera, 2021).

Tabela 5 - Composição Centesimal de Nutrientes e Minerais em base seca do Feijão carioca cru.

Nome	Quantidade média	Unidade	Mínimo	Máximo
Água	0	g	0	0
Proteína	25,2	g	24,7	25,8
Lípido total	1,44	g	1,33	1,52
Carboidratos:				
Fibra, dieta total	4,5	g	4,3	4,7
Amido	36	g	34.4	38,4
Minerais:				
Cálcio	194	mg	177	204
Ferro	5,87	mg	4,75	7,74
Magnésio	179	mg	165	200
Fósforo	535	mg	457	614
Potássio	1.390	mg	1.060	1.620
Zinco	3,36	mg	2,94	3,56
Cobre	1,04	mg	0,925	1,14
Manganês	1,93	mg	1,77	2.08
Enxofre	257	mg	248	264
Níquel	177	µg	101	276
Molibdênio	962	µg	467	1.430
Cobalto	39	µg	35	45
Boro	1.160	µg	1.030	1.270

Fonte: Adaptado de Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (2019).

Os micronutrientes, embora exigidos em pouca quantidade, desempenham funções vitais para o funcionamento do corpo humano. No entanto, em muitas partes do mundo, em especial aquelas onde a dieta com base em alimentos de origem animal é baixa, as quantidades de micronutrientes ingeridas são insuficientes ou ainda, a quantidade de antinutrientes presentes naquela dieta dificulta a absorção. As deficiências de ferro e o zinco são as mais comuns se tratando de saúde pública global. Esses micronutrientes têm baixa biodisponibilidade sob a presença de antinutrientes (principalmente o fitato), que se ligam aos minerais no intestino humano, dificultando sua absorção (Nações Unidas & FAO, 2019).

Embora seja uma excelente fonte de proteínas, carboidratos, macro e micronutrientes essenciais, o feijão apresenta algumas características indesejáveis que limitam sua aceitação e seu valor nutricional, tal como a presença de fatores antinutricionais, dentre os quais os principais são: fitatos, taninos, lectina, inibidores de protease entre outros (Bonett et al., 2007). Esses antinutrientes possuem potencial quelante, podendo ligar-se a proteínas e íons metálicos, como o ferro e o zinco, formando complexos insolúveis e de baixa digestibilidade, tornando-os um alimento de baixa disponibilidade (fração de micronutrientes que atravessa as barreiras intestinais e está disponível para o corpo) (Bassinello, 2009; Bigonha, 2013; Da Silva et al., 2006; Huertas et al., 2022). Ramírez-Cárdenas et al. (2006) ressaltam que os antinutrientes podem ter sua contribuição como alimento funcional para o tratamento de determinadas doenças crônicas. Entretanto, para situações de carência nutricional, esses compostos têm pouco a agregar na alimentação.

Como solução para este problema, pesquisas envolvendo métodos para redução de antinutrientes através da utilização de processamento doméstico têm proporcionado efeitos positivos na biodisponibilidade de nutrientes. Tais práticas envolvem: imersão em água pré-cozimento (“demolho”); descascamento; germinação; fermentação; e cozimento. Existem barreiras associadas a alguns desses métodos, como no caso da fermentação e a germinação, por exemplo, pois estas acarretam propriedades organolépticas indesejáveis, apesar de serem eficientes na redução de antinutrientes (Pinheiro et al., 2020; Valdés, 2010).

Em seu estudo sobre influência de diferentes processamentos térmicos domésticos sobre composição centesimal e de antinutrientes em variedades de feijão, Ramirez-Cárdenas et al. (2006) constataram que em todas as cultivares avaliados, o cozimento sem maceração já é suficiente para promover uma acentuada redução no conteúdo de taninos comparado com os feijões submetidas aos outros métodos, conforme indicado na Tabela 6. O cozimento de feijão macerado sem a água de maceração promoveu uma redução apenas ligeiramente superior à obtida quando os feijões foram cozidos com água de maceração e ou quando foram cozidos sem maceração. Todos os processamentos tendem a reduzir de forma significativa o teor de ferro, não afetando de forma significativa o conteúdo de zinco das cultivares. Nakitto et al. (2015), relatou maior eficiência para redução de fitatos e taninos quando os grãos foram descascados antes de serem submetidos ao processamento térmico, indicando também maior disponibilidade de ferro e zinco e digestibilidade da proteína.

Tabela 6 - Concentração de proteínas, minerais e fatores antinutricionais em base seca para cultivares de feijão submetidos a diferentes processamentos térmicos.

Processamento Térmico	Variedade *	Proteínas (g/100g)	Ferro (g/100g)	Zinco (g/100g)	Fitatos (μmol/g)	Taninos (mg/100g)
			)	)	**	***
CRU:	PER	22,57	7,35	3,19	20,96	102,45
	BRS	23,22	4,81	2,72	25,17	182,60
CSAM:	PER	23,84	5,68	3,44	16,77	16,92
	BRS	24,67	4,42	2,78	20,96	33,94
CCAM:	PER	23,25	5,17	3,15	17,90	18,43
	BRS	25,61	4,87	3,03	22,35	34,94
CSM:	PER	22,24	5,28	3,49	19,14	20,07
	BRS	23,75	4,52	3,35	22,71	37,11

Fonte: Ramirez-Cárdenas et al. (2006). CRU: Feijão Cru; CSAM: Feijão Cozido Sem Água de Maceração; CCAM: Feijão Cozido Com Água de Maceração; CSM: Feijão Cozido Sem Maceração. * Variedades PER = Pérola, BRS = BRS Radiante. ** Os valores para fitatos correspondem a soma de hexafosfato de inositol e pentafofato de Inositol. *** Teor de tanino expresso como mg catequina/100 g.

Assim como a redução de fatores antinutricionais é crucial para melhorar a absorção de minerais como ferro e zinco, é igualmente importante aumentar os teores desses micronutrientes na planta. O feijão biofortificado com ferro e zinco tem o teor desses micronutrientes muito mais alto do que o feijão não biofortificado, sendo capaz de fornecer uma quantidade significativa desses elementos mesmo sob alta concentração de compostos antinutricionais (Petry et al., 2015).

Dessa forma, percebe-se que a biofortificação tem sido estratégia promissora, quando o objetivo é elevar as concentrações de minerais essenciais diretamente nos grãos, a partir de práticas de manejo agrônomo e melhoramento genético (Bhardwaj et al., 2022). Essa prática tem sido adotada com o intuito de potencializar o valor nutricional do feijão visando combater deficiências nutricionais humanas.

3.4 Biofortificação do feijoeiro

A biofortificação é uma estratégia agrícola que consiste em aumentar o teor de nutrientes nas culturas, aumentando o teor de vitaminas e minerais em alimentos básicos, melhorando sua biodisponibilidade para a população humana (Baum et al., 2024). Esse processo objetiva o aumento dos níveis de vitaminas ou micronutrientes específicos em partes da planta que sejam comestíveis, utilizando-se para tanto do melhoramento genético convencional ou por meio de transgenia (Figura 3); associados ainda ao adequado manejo da cultura, seja por meio de adubação convencional via solo e/ou via foliar (Cambraia et al., 2019; Figueiredo, 2016; Cakmak, 2008; White e Broadley, 2009). Com essa abordagem, é possível obter uma solução eficiente e sustentável para enfrentar as deficiências generalizadas de micronutrientes, especialmente em regiões com diversidade alimentar limitada e acesso restrito a alimentos de origem animal (Baum et al., 2024).

Figura 3 - Técnicas convencionais e avançadas de biofortificação usadas em programas de produção e melhoramento de culturas.



Fonte: Bhardwaj et al. (2022).

Para que uma cultura seja utilizada como veículo de biofortificação, algumas condições devem ser atendidas, tais como: Existe variabilidade genética o suficiente para que, através de programas de melhoramento convencional, possa ser possível atingir a densidade de micronutrientes necessária, conforme estabelecido pelos profissionais da área de saúde? Quando consumidos em condições controladas, os nutrientes extras adicionados aos alimentos básicos estarão biodisponíveis e serão absorvidos em níveis suficientes para melhorar a condição dos níveis de micronutrientes? Os agricultores adotarão as variedades biofortificadas e os consumidores irão adquirilas/consumi-las em quantidades suficientes? Vale ressaltar ainda que, quando a cultura não apresente variabilidade para aplicação do melhoramento convencional, é necessário a utilização de engenharia genética para obter cultivares transgênicas (Lima et al., 2021; Bouis et al., 2013).

A biofortificação agrônômica é uma prática complementar para tornar as culturas mais nutritivas. Ela consiste na eficiente aplicação de adubos minerais, utilizando para tanto a adubação via solo e/ou foliar, tratamento de sementes, aplicação de biofertilizantes, fertirrigação e rotação de culturas, garantindo um

aumento temporário de micronutrientes. Também faz parte dessa prática, o aproveitamento eficiente desses compostos pela planta, seja aumentando a mobilidade e solubilidade desses nutrientes para melhor absorção pela planta, quanto adaptando as características intrínsecas do solo (pH, teor de matéria orgânica, estrutura do solo), garantindo uma absorção maior dos nutrientes de interesse (Junior et al., 2017; Saltzman et al., 2013; Loureiro et al., 2018).

O uso da adubação contendo micronutrientes é um método relativamente simples, rápido e economicamente viável para aumentar o estado nutricional da cultura, ganhando visibilidade devido sua eficácia quando bem executado. Sida-Arreola et al. (2017), apontaram ganhos significativos de macro e micronutrientes, bem como na capacidade antioxidante de grãos de feijão submetidos a biofortificação foliar com diferentes fontes e doses de zinco. Ram et al. (2016), indicaram a compatibilidade de Zn foliar com diferentes inseticidas e fungicidas, tendo resultados expressivos no ganho de concentração de Zn no grão de feijão, encorajando o agricultor a adicionar Zn nas caldas de pulverização como meio de melhorar o estado nutricional da planta. Yousefi et al. (2023), encontraram resultados significativos com a aplicação foliar de ferro sobre o peso de cem sementes, produção de sementes e concentração de ferro e zinco em partes áreas das plantas.

Adubação de micronutrientes como fertilizantes no solo tem como objetivo corrigir o teor daquele micronutriente no ambiente, bem como corrigir sua deficiência nutricional nas plantas cultivadas. Entretanto, em muitos casos, os micronutrientes aplicados via solo são imediatamente fixados e não são facilmente absorvidos pelas raízes. Isso ocorre principalmente em nutrientes de baixa mobilização no solo, como é o caso do ferro e o zinco, sendo que sua disponibilidade pode variar ainda de acordo com o pH do solo, fatores esses que acabam influenciando para que a aplicação desses nutrientes de forma corretiva seja preferencialmente feita via foliar (Bhardwaj et al., 2022; Yousefi et al., 2023; Brasil & Cravo, 2007)

A biofortificação usando técnicas de melhoramento convencional tem sido amplamente adotado e ganhou muita importância devido sua implementação viável e econômica, garantindo uma alta eficiência na fortificação de micronutrientes (Straeten et al., 2020). A presença de variabilidade genética é um grande requisito para a condução de programas de melhoramento nas

plantas, sendo que quando essa variedade existe, ela pode ser explorada para aumentar os níveis de vitaminas e minerais. O Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) avaliou mais de 1000 acessos de feijão, encontrando variações entre 34 e 89 mg/kg para ferro nos grãos e 21 e 54 mg/kg para zinco nos grãos (Rios et al., 2009), sendo que em alguns países como o Peru, existem relatos de plantas com teores de ferro acima de 100 mg/kg (Gregorio, 2002).

Através desse método, linhagens parentais de qualidade superior, com alto teor de nutrientes, são cruzadas com linhagens receptoras com outras características agrônômicas de interesse, garantindo que o produtor consiga qualidade nutricional a um alimento com características organolépticas semelhantes ao que já estava habituado (Bhardwaj et al., 2022; Junior et al., 2017). Conforme os cruzamentos são realizados, as plantas com as características desejáveis são selecionadas durante as gerações. Entretanto, uma desvantagem desse método consiste no longo período necessário para a inserção de características de interesse, além da necessidade de compatibilidade entre as espécies cruzadas (Rios et al., 2009)

A biofortificação por engenharia genética (transgenia), é um método necessário quando não há variabilidade genética do conteúdo de nutrientes. Essa prática consiste na manipulação da constituição dos genes de um organismo vivo, seja por eliminação, modificação ou adição de cópias de genes específicos, frequentemente oriundos de outros organismos, por meio de técnicas de biologia molecular, tais como o DNA recombinante ou fusão celular. A engenharia genética permite que as plantas com melhor desempenho sejam selecionadas em uma única geração, assim os novos genes são introduzidos diretamente em cultivares locais. Também permite que características nutricionais sejam direcionadas para órgãos específicos e que vários atributos possam ser combinados na mesma planta. Através dessa tecnologia, é possível enriquecer a parte comestível da cultura com os micronutrientes de interesse sem alterar o desempenho agrônômico da planta (Loureiro et al., 2018).

Técnicas transgênicas podem ser adotadas para melhorar o aumento do transporte de micronutrientes entre tecidos, permitindo que ele se acumule em um tecido comestível. Além disso, seu uso permite o aumento da concentração e biodisponibilidade de nutrientes, podendo reduzir até mesmo os fatores antinutricionais. Em contrapartida, existem muitos desafios associados ao uso

dessa tecnologia, dentre todos os outros métodos, esse é o mais dispendioso, exigindo um financiamento contínuo para pesquisa, desenvolvimento e implantação da variedade. Além disso, sua aceitabilidade por parte dos consumidores é baixa, exigindo uma maior conscientização sobre este tema (Loureiro et al., 2018; Bhardwaj et al., 2022; Avnee et al., 2023; Vieira, 2022).

O HarvestPlus é um programa criado em 2004 pela Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR), e coordenado pelo Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) e o Instituto de Pesquisa Sobre Políticas Alimentares (IFPRI), com foco em identificar populações-alvo para condução de pesquisas com o intuito de viabilizar a biofortificação. Esse programa é responsável por ampliar a produção e o consumo de culturas básicas, unindo alto rendimento, adaptabilidade ao clima e enriquecimento de ferro, zinco ou vitamina A. Atualmente, a HarvestPlus conta com 13 culturas distintas biofortificadas, presentes em em 41 países, onde os principais continentes são África, Ásia e América Latina (Figura 4) (HarvestPlus, 2024).

Figura 4 - Presença de culturas biofortificadas pela HarvestPlus em diferentes países ao redor do mundo.



Fonte: HarvestPlus (2024).

Em 2008, foi proposto e aprovado o projeto BioFORT: Biofortificação no Brasil, um programa financiado pela Embrapa e Monsanto, com o intuito de

desenvolver produtos agrícolas mais nutritivos. Pela primeira vez, desde que haviam começado em 2003 pela Embrapa, os programas de biofortificação passaram a contar com recursos nacionais para o custeio e investimento (Nutti, 2011). O foco da rede BioFORT é o desenvolvimento de cultivares biofortificadas através do melhoramento genético convencional nas culturas de arroz, feijão, feijão-caupi e trigo para melhoramento de ferro e zinco, além de mandioca, milho, abóbora e batata-doce para maior teor de vitamina A (Santos, 2023).

Dentre os cultivares de feijão desenvolvidos pela Biofort, quatro merecem destaque: BRS Supremo, BRS Cometa, BRS Sublime e BRS FC409. Os teores médios dessas cultivares para Fe e Zn são superiores, quando comparados aqueles encontrados nas variedades mais plantadas do Brasil (Pérola e BRS Estilo), conforme pode ser observado na Tabela 7 (Pereira, 2020).

Tabela 7 - Teores Médios de Ferro (Fe) e Zinco (Zn) em Cultivares de Feijão.

Cultivar	Teor médio de Fe (mg/kg)	Teor médio de Zn (mg/kg)
Pérola	59	29
Estilo BRS	52	29
BRS Supremo	65	32
BRS Cometa	64	31
BRS Sublime	64	31
BRS FC409	66	35

Fonte: Pereira (2020).

Para introduzir com sucesso uma cultura biofortificada no sistema alimentar, os fatores ambientais também devem ser adequadamente abordados. Com o intuito de aumentar a sustentabilidade da biofortificação em geral, e do feijão em particular, é imprescindível levar em consideração o impacto do clima, solos e práticas agronômicas para altas concentrações de ferro e zinco (Petry et al., 2015).

3.5. Disponibilidade de ferro e zinco no solo

Para que a biofortificação atinja seu pleno potencial e contribua efetivamente para a redução de deficiências nutricionais, é necessário associá-la a práticas de manejo adequadas, devido ao impacto do ambiente sobre a expressão dos micronutrientes (Bouis & Saltzman, 2017). Raij (2011) afirma que a absorção dos nutrientes pela planta é condicionada pelas boas práticas agrônômicas, bem como pelas condições climáticas, a disponibilidade no nutriente, a forma em que esse nutriente se encontra e a capacidade de absorção deste pela planta. Neste contexto, compreender e aplicar essas práticas torna-se essencial para maximizar os benefícios da biofortificação, ampliando não apenas a produtividade, mas também a qualidade nutricional dos grãos.

Para aumentar as concentrações de minerais em tecidos comestíveis, como os grãos do feijão, sem que haja perda de rendimento, é necessário haver aumento da absorção pelas raízes (de minerais presentes na solução do solo) ou folhas (para minerais aplicados via foliar), para que possa ocorrer de forma efetiva a redistribuição e acúmulo desses nutrientes na porção comestível (Welch & Graham 2005). De acordo com Quaggio & Chiba (2022), a amostragem do solo é a primeira etapa fundamental para implementar um bom sistema de fertilidade de solo, uma vez que a análise de solo permite a tomada de decisões importantes.

A adubação com ferro na cultura do feijão visando suprir as exigências nutricionais da planta não é muito relatada no Brasil. Isso se deve, provavelmente, pois, no Brasil, predominam os solos de baixa a média fertilidade com alto teor de óxidos de ferro (Latossolo e Argissolo distrófico), sendo que somente no estado de São Paulo, os latossolos com alto teor de óxido de ferro ($Fe^2 \geq 180g/kg$) ocupam aproximadamente 14% do território (Junior & Manzatto, 2002). O ferro é um mineral presente no solo na predominantemente na forma de cátion trivalente (Fe^{3+}), sendo que essa forma não é facilmente absorvida pela planta, que necessita do ferro em sua forma ferrosa (Fe^{2+}) para ser absorvido (Magomere et al., 2024). Em condições de solos tropicais ricos em óxidos de ferro, a deficiência é praticamente inexistente em campo (Boaretto et al., 2022). A adubação com ferro, em condições em que este se encontra em

teores apropriados no solo, pode até mesmo ser associada a baixa produtividade, ou então a falta de resposta pela adubação, assim como reportado por Guimarães et al. (2011) e Feletti et al. (2017).

Não há recomendação para adubação com ferro para a cultura do feijão de acordo com o boletim 100 (Wutke et al., 2022), isso pode ser explicado devido à alta presença de óxidos de ferro nos solos tropicais, onde raramente os teores de ferro no solo se encontram abaixo do limite estabelecido pelo boletim 100 (Tabela 8). A exigência desse nutriente se torna comprometida principalmente em solos de pH alcalino, sendo que plantas cultivadas em solos ácidos (pH 6,0) podem apresentar 25% a mais de ferro em relação àquelas cultivadas em solos alcalinos (pH 7,3) (Moraghan et al., 2002). Segundo Moraes et al. (2009), o ferro é um nutriente com forte regulação genética, e as práticas de manejo apresentam pouca capacidade em aumentar sua concentração nos grãos. Em casos de deficiência de ferro, pode ser utilizada aplicação de correção deste nutriente de preferência via foliar em forma de quelato devido sua alta solubilidade em água. Seu teor adequado na folha do feijoeiro se situa entre 300-500 ppm de Fe (Rosolem & Marubayashi, 1994; Boaretto et al., 2022).

Tabela 8 - Limites de interpretação dos teores de micronutrientes em solos extraídos com solução de DTPA em solos tropicais e subtropicais para culturas anuais e teor médio encontrado de ferro e zinco.

Categoria	Baixo	Médio	Alto	Teor médio encontrado (g/dm³)
Ferro (mg/dm³)	< 5	5 – 12	> 12	40
Zinco (mg/dm³)	< 0,6	0,6 – 1,2	> 1,2	0,09

Fonte: Boaretto et al. (2022); Ronquim (2020).

O zinco, conforme Ronquim (2020), é um micronutriente que inicialmente se encontra em boas concentrações no solo, com uma média de 90 mg/dm³. No entanto, de acordo com Malavolta (1996), a quantidade de zinco disponível na solução do solo é geralmente baixa, apresentando-se principalmente como

cátion divalente (Zn^{2+}). Essa disponibilidade é limitada, pois as raízes das plantas só podem absorver ferro e zinco em suas formas iônicas, processo regulado por diversos fatores, incluindo pH, matéria orgânica, interação com outros nutrientes

A deficiência de zinco é um problema recorrente na região do Cerrado, onde os níveis desse micronutriente são notoriamente baixos. Marques e cols. (2004), ao compararem teores de elementos em solos de várias partes do mundo, constataram que o Cerrado apresenta menos de 50% do teor médio mundial de zinco. Essa deficiência é atribuída ao longo processo de intemperismo durante a formação pedogenética da região, que promove a lixiviação e o esgotamento de cátions mono e divalentes. Em um estudo de Fageria & Stone (1999) com cerca de 200 amostras de solo do Cerrado, foi encontrado um teor médio de $1,0 \text{ mg/dm}^3$ de zinco e $116,0 \text{ mg/dm}^3$ de ferro. Esses pesquisadores destacam que a deficiência de zinco é comum

Wutke et al. (2022) recomendam a aplicação de 3 kg/ha de Zn-DTPA quando o teor de zinco não for inferior a $0,6 \text{ mg/dm}^3$, com a saturação por bases recomendadas para a cultura em torno de 70%. A disponibilidade de micronutrientes é influenciada por características do solo, como textura, mineralogia, pH, teor de matéria orgânica e umidade. Nos solos tropicais, o pH é o principal fator que controla essa disponibilidade. À medida que o pH aumenta, a disponibilidade de ferro e zinco tende a diminuir (Boaretto et al., 2022). Por outro lado, em pH mais baixo, há maior solubilidade de elementos como alumínio, manganês e ferro, que podem ser tóxicos para as plantas em excesso. Fageria & Stone (1999) afirmam que, embora os teores de micronutrientes estejam dentro da faixa recomendada para a cultura, não há problemas de disponibilidade em solos com pH entre 5,7 e 6,3 ou saturação por bases de

Segundo Magomere et al. (2024), o pH do solo regula os teores de ferro e zinco nos grãos do feijão comum, e o genótipo da planta também influencia a concentração desses micronutrientes em seus tecidos comestíveis. Em solos com pH de 5,3, a concentração de ferro pode ser comprometida devido à competição com o manganês, que limita a absorção de ambos os micronutrientes. Além disso, a deficiência de zinco interfere na absorção de ferro, dificultando sua translocação da raiz para a parte aérea da planta. A presença de matéria orgânica também pode afetar a absorção de ferro (Santos et al., 2020).

O zinco tem sua absorção e disponibilidade diminuída acima de pH 6,5, sendo que sua disponibilidade é maior em solos com maior teor de matéria orgânica e com uma proporção maior em teor de argila. Entretanto, o teor de fosfato está intimamente ligado na redução da extratibilidade de Zn e Fe do solo, reforçando que o teor total de Zn nos solos pode ser grande, entretanto, sua fração disponível para as plantas é baixa devido a quantidade de vários fatores ligados a aspectos físicos, químicos e biológicos que regem a disponibilidade desse nutriente para a planta (Rengel, 2015).

Conforme discutido, a disponibilidade de ferro e zinco nos grãos do feijão é comumente condicionada por fatores ambientais, como o pH do solo, a competição entre nutrientes e as características físicas do solo, como a matéria orgânica e teor de argila. Essas variáveis impactam diretamente a capacidade da planta em absorver e acumular esses micronutrientes em seus tecidos comestíveis. No entanto, o sucesso da biofortificação, que visa aumentar as concentrações de ferro e zinco nos grãos para melhorar o valor nutricional dos alimentos, enfrenta desafios adicionais. Entre esses, estão as limitações genéticas, as interações antagônicas entre nutrientes e os critérios específicos de manejo do solo, bem como a falta de regulamentação sobre produtos biofortificados.

3.6 Desafios e limitações

Para que os feijões biofortificados ricos em ferro e zinco sejam adotados pelos agricultores, eles precisam apresentar desempenho agrônomico comparável às variedades convencionais. No entanto, combinar características como alto teor desses micronutrientes e rendimento aceitável, além de atender a critérios de cor, tamanho e formato dos grãos, tem se mostrado um desafio significativo. A dificuldade é acentuada pela relação inversamente proporcional entre altos teores de ferro e zinco e o alto rendimento das plantas, segundo Beebe et al. (2020) e Yousefi et al. (2023).

A biofortificação agrônômica é uma estratégia cada vez mais difundida, mas sua eficácia é imprevisível devido às variações nas condições dos solos e nas regiões onde o feijão é cultivado. Em muitas situações, não há garantias de

que os micronutrientes aplicados ao solo serão efetivamente concentrados nas partes comestíveis da planta, o que reduz a taxa de sucesso dessa prática, especialmente para minerais e espécies vegetais específicas (Srivastav et al., 2022).

Os esforços no melhoramento de cultivares de feijão têm priorizado o aumento da produtividade, e isso resultou em cultivares modernas que, embora mais produtivas, apresentam níveis mais baixos de micronutrientes e vitaminas essenciais. Como resultado, o melhoramento voltado para a qualidade nutricional como: teor de proteínas, minerais, gorduras e ácidos graxos frequentemente fica em segundo plano (Celmeli et al., 2018).

Além disso, os compostos antinutricionais, como o ácido fítico, representam um obstáculo à biodisponibilidade de ferro e zinco no feijão. Embora o sucesso da biofortificação dependa tanto do aumento dos nutrientes de interesse quanto da redução dos antinutrientes, as variedades mutantes com menor produção de ácido fítico tendem a apresentar problemas, como menor rendimento e germinação reduzida. Isso ocorre porque o ácido fítico é uma importante forma de armazenamento de fósforo na planta, além de proteger as sementes contra o estresse oxidativo (Ramakrishna et al., 2024).

Segundo Mastrogiacomo (2022), no Brasil, não há algum tipo de selo ou certificação para alimentos biofortificados. Dessa forma, não é possível garantir os teores dos micronutrientes de produtos biofortificados para o consumidor final, impedindo a agregação de valor no produto que serviria de estímulo ao produtor em tentar atingir maior teor de ferro e zinco nos grãos de feijão. Em muitos países, a biofortificação se tornou política pública, onde os agricultores recebem bonificação pelos alimentos biofortificados, no entanto, esse não é o cenário brasileiro atualmente.

Assim como mencionado por Ram et al. (2016), não se espera que os governos garantam preços melhores para culturas que apresentem um alto teor de micronutrientes, sendo assim, o encorajamento pela biofortificação agrônômica se deve ao fato de corrigir deficiências nutricionais apresentadas pelas plantas, pois, suprir as exigências nutricionais da planta com micronutrientes pode, conseqüentemente, contribuir com uma melhor produtividade das culturas.

A ausência de regulamentação sobre produtos biofortificados permite a entrada desses alimentos para toda a cadeia produtiva, desde os agricultores até o consumidor final, sem qualquer tipo de controle regulatório. Nos últimos tempos, essa falta de controle regulatório têm sido debate por levantar questões que abordam o fato de que os produtos biofortificados podem apresentar maiores teores de micronutrientes, todavia, os macronutrientes podem ter seu teor reduzido durante esse processo (Loureiro et al., 2018)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do que foi apresentado, o feijão comum destaca-se pela sua importância na segurança alimentar e nutricional do Brasil, evidenciando seu papel como fonte acessível de ferro, zinco e nutrientes essenciais para combater a fome oculta. No entanto, os desafios relacionados à variabilidade na produção, à escolha de cultivares biofortificados e à implementação de práticas agrônômicas eficientes são limitantes para o enriquecimento de micronutrientes, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada.

Nesse contexto, a adoção de estratégias de manejo agrícola, incluindo a correção e fertilização dos solos, e a utilização de cultivares com maior teor de micronutrientes demonstraram ser caminhos promissores para aumentar a produtividade e a qualidade nutricional do feijão. Essas ações, aliadas a políticas públicas que incentivem a biofortificação e a disseminação de conhecimentos entre agricultores e consumidores finais, podem potencializar os benefícios desse alimento na dieta brasileira.

Por fim, os avanços no campo da biofortificação dependem do fortalecimento da pesquisa interdisciplinar e da cooperação entre instituições de ensino, órgãos governamentais e produtores rurais. Apenas por meio de esforços contínuos será possível alcançar o pleno potencial do feijão na promoção de uma alimentação saudável e sustentável, contribuindo para a redução das deficiências nutricionais da população.

5. REFERÊNCIAS

AVNEE et al. Biofortification: an approach to eradicate micronutrient deficiency. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1233070, 2023.

BASSINELLO, P. Z. et al. Qualidade nutricional, funcional e tecnológica do feijão. 2009.

BAUM, Michael; TIWARI, Vandita; MEENU, Maninder; KHANDARE, Kiran; SHEORON, Bhawna; KAUR, Satveer; YADAV, Mona. Biofortification: Concept and methodologies. In: **Biofortification for nutrient-rich crops**. 1st ed. 2024. CRC Press. p. 13. ISBN 9781032690636.

BEEBE, Stephen. Biofortification of common bean for higher iron concentration. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 4, p. 573449, 2020.

BHARDWAJ, Ajay Kumar et al. Agronomic biofortification of food crops: An emerging opportunity for global food and nutritional security. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1055278, 2022.

BIGONHA, Solange Mara. Qualidade proteica e biodisponibilidade de ferro e zinco em feijões biofortificados. 2013.

BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A.; MELLIS, E. V.; CANTARELLA, H. (2022). Fertilização de culturas permanentes. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds.). *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (Boletim Técnico 100), p. 121-129.

BONETT, Lucimar Pereira et al. Compostos nutricionais e fatores antinutricionais do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). **Arquivos de Ciências da Saúde da UNIPAR**, v. 11, n. 3, 2007.

BOUIS, Howarth E.; SALTZMAN, Amy. Improving nutrition through biofortification: a review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. **Global food security**, v. 12, p. 49-58, 2017.

BOUIS, Howarth et al. Biofortification: evidence and lessons learned linking agriculture and nutrition. **The Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and the World Health Organization (WHO)**, v. 18, 2013.

BRASIL, Edilson Carvalho; CRAVO, M. da S. Interpretação dos resultados de análises de solo. **CRAVO, M. da S.; VIÉGAS, I. de JM**, p. 43-47, 2007.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, The Hague, v. 302, n. 1, p. 1-17, Jan. 2008.

CAMBRAIA, Thaís Lopes Leal et al. Biofortificação agrônômica de grãos de feijão com zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. e01003, 2019.

CARDOSO, Alexander Machado; DA SILVA, Carlos Vinicius Ferreira; DE PÁDUA, Vânia Lúcia. Microbial Insights into Biofortified Common Bean Cultivation. **Sci**, v. 6, n. 1, p. 6, 2024.

CAVALCANTE, Regina Márcia Soares et al. Estratégias de suplementação com zinco para adultos. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e540986115-e540986115, 2020.

CELMELI, Tugce et al. Conteúdo nutricional de variedades locais de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) em comparação com variedades modernas. **Agronomia**, v. 8, n. 9, p. 166, 2018.

CHÁVEZ-SERVIA, José Luis et al. Diversidade de variedades locais de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e o valor nutricional de seus grãos. **Leguminosas para grãos**, p. 1-33, 2016.

CHIORATO, A. F. et al. Global vision on common bean breeding cultivars. **Phaseolus vulgaris: cultivars production and uses**, p. 27-68, 2018.

COELHO, Jackson Dantas. Feijão: produção e mercados. 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Boletim da Safra de Grãos 2023/2024. Brasília: Conab, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 18 out. 2024.

CRUZ, Josilaine B. Fernandes; SOARES, Henrique Freire. Uma revisão sobre o zinco. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 15, n. 1, p. 207-222, 2011.

DIAZ, Santiago et al. Genetic correlation between Fe and Zn biofortification and yield components in a common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 739033, 2022.

FAGERIA, NAND KUMAR; STONE, Luis Fernando. Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil. 1999.

FELETTI, Evander Favoreto et al. IMPLICAÇÃO DA ADUBAÇÃO FOLIAR NOS TEORES DE MICRONUTRIENTES EM GRÃOS DE FEIJÃO.

FERREIRA, C. M. et al. Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar. 2021.

FIGUEIREDO, Marislaine Alves de. Biofortificação com zinco, selênio e ferro, e biodisponibilidade de ferro em cultivares de feijoeiro-comum. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO); INTERNATIONAL FUND FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT (IFAD); UNITED NATIONS CHILDREN'S FUND (UNICEF); WORLD FOOD PROGRAMME (WFP); WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023.

GARG, Monika et al. Biofortified crops generated by breeding, agronomy, and transgenic approaches are improving lives of millions of people around the world. **Frontiers in Nutrition**, v. 5, p. 12, 2018.

GERBER, M. P. *Anemia por deficiência de ferro*. In: MANUAL MSD, versão para profissionais. 2023. Disponível em: https://www.msdmanuals.com/pt/profissional/hematologia-e-oncologia/anemias-causadas-por-eritropoese-deficiente/anemia-por-defici%C3%Aancia-de-ferro#Fisiopatologia_v968992_pt. Acesso em: 24 out. 2024.

GLAHN, Raymond P.; NOH, Hannah. Redefining bean iron biofortification: a review of the evidence for moving to a high Fe bioavailability approach. **Frontiers in sustainable food systems**, v. 5, p. 682130, 2021.

Gregorio GB (2002) Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *Journal of Nutrition*, 132:500S-502S.

GUIMARÃES, Cleber Moraes et al. Biofortificação via aplicação de ferro no solo: respostas de genótipos de feijoeiro. 2011.

HARVESTPLUS. HarvestPlus. Disponível em: <https://www.harvestplus.org/>. Acesso em: 27 out. 2024.

HUERTAS, Raul et al. Biofortification of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) with iron and zinc: Achievements and challenges. **Food and Energy Security**, v. 12, n. 2, p. e406, 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa de orçamentos familiares: 2017-2018: análise do consumo alimentar*

peçoal no Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101742>. Acesso em: 20 out. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes*. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: [URL]. Acesso em: 20 out. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção agropecuária: feijão*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/feijao/br>. Acesso em: 11 out. 2024.

IBRAFE - Instituto Brasileiro do Feijão e Pulses. O consumo de feijão caiu no Brasil?. *IBRAFE*, São Paulo, 20 set. 2023. Disponível em: <https://www.ibrafe.org/noticias/o-consumo-de-feijao-caiu-no-brasil#:~:text=Segundo%20estimativas%20da%20Embrapa%20Arroz,12%2C2%20kg%2Fhab>. Acesso em: 14 out. 2024.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. *Plant micronutrient uptake challenges and the benefits of chelated fertilizers*. Disponível em: <https://www.fertilizer.org/news/plant-micronutrient-uptake-challenges-and-the-benefits-of-chelated-fertilizers/>. Acesso em: 01 out. 2024.

JHA, A. B.; WARKENTIN, T. D. Biofortification of pulse crops: Status and future perspectives. *Plants* 9 (1): 73. 2020.

JOHNSON, T. Deficiência de zinco. *Manual MSD – Versão para Leigos*. 2023. Disponível em: <https://www.msmanuals.com/pt/casa/dist/%C3%BArbios-nutricionais/minerais/defici%C3%A2ncia-de-zinco>. Acesso em: 24 out. 2024.

JUNIOR, F. E. de; MANZATTO, C. V.; PERES, J. R. R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

JUNIOR, M. E. et al. *Agronomia: colhendo as safras do conhecimento. Melhoramento genético visando qualidade do grão de soja*, v. 1, 2017.

KARAVIDAS, I. et al. Agronomic practices to increase the yield and quality of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): a systematic review. *Agronomy*, vol. 12, no. 2. 2022.

KUMAR, Vikas; SINHA, Amit K. General aspects of phytases. In: **Enzymes in human and animal nutrition**. Academic Press, 2018. p. 53-72.

LIMA, Francisco et al. BIOFORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS MÉTODOS DE CAMPO UTILIZADOS NO ENRIQUECIMENTO DE PARTES COMESTÍVEIS DE VEGETAIS COM ZINCO E O ENFRENTAMENTO DA DESNUTRIÇÃO HUMANA: MÉTODOS DE CAMPO UTILIZADOS NO ENRIQUECIMENTO DE PARTES COMESTÍVEIS DE VEGETAIS COM ZINCO E O ENFRENTAMENTO DA DESNUTRIÇÃO HUMANA. In: **AGRICULTURA E AGROINDÚSTRIA NO CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL**. Editora Científica Digital, 2021. p. 82-94.

LOUREIRO, Marina Paraluppi et al. Biofortificação de alimentos: problema ou solução?. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 25, n. 2, p. 66-84, 2018.

MAGOMERE, Kinguye Masamaki; NCHIMBI-MSOLLA, Susan; TRYPHONE, George Muhamba. Effects of soil pH levels on iron and zinc concentrations of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. 2024.

MALAVOLTA, Eurípedes. Nutri-Fatos. **Arquivo do Agrônomo**, n. 10, 1996.

MARQUES, Joao José et al. Trace element geochemistry in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 121, n. 1-2, p. 31-43, 2004.

MARQUEZI, Milene. **Características físico-químicas e avaliação das propriedades tecnológicas do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2013. Tese de Doutorado. Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, Florianópolis.

MASTROGIACOMO, Sandra. Alimentos biofortificados: força no prato dos brasileiros. Associação dos Engenheiros Agrônomos do Estado de São Paulo, 2022. Disponível em: <https://aeasp.org.br/alimentos-biofortificados-forca-no-prato-dos-brasileiros/>. Acesso em: 31 out. 2024.

MESQUITA, Fabrício Rivelli et al. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 1114-1121, 2007.

MORAES, Milton Ferreira et al. Práticas agronômicas para aumentar o fornecimento de nutrientes e vitaminas nos produtos agrícolas alimentares. I **Simpósio Brasileiro de Aprovecuária Sustentável, Viçosa. Anais, UFV**, p. 299-312, 2009.

MORAGHAN, J. T. et al. Iron accumulation in seed of common bean. **Plant and Soil**, v. 246, p. 175-183, 2002.

NAKITTO, Aisha M.; MUYONGA, John H.; NAKIMBUGWE, Dorothy. Effects of combined traditional processing methods on the nutritional quality of beans. **Food science & nutrition**, v. 3, n. 3, p. 233-241, 2015.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. Iron: Health Professional. Disponível em: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iron-HealthProfessional/>. Acesso em: 24 out. 2024.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. Zinc: Datos en Español. Disponível em: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-DatosEnEspañol/>. Acesso em: 24 out. 2024.

NUTTI, Marília R. A história dos Projetos HarvestPlus, AgroSalud e BioFORT no Brasil. 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. FAOSTAT. 2022. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/>. Acesso em: 19 set 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Hidden hunger: a global public health problem*. Genebra: OMS, 2023. Disponível em: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/376869/9789240094703-eng.pdf?sequence=1>. Acesso em: 22 out. 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Prevalência mundial de anemia 1993-2005: WHO global database on anaemia. Genebra: OMS, 2008.

PEREIRA, Helton Santos et al. Biofortificação feijão-comum. 2020.

PETRY, Nicolai et al. The potential of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) as a vehicle for iron biofortification. **Nutrients**, v. 7, n. 2, p. 1144-1173, 2015.

PETRY, Nicolai et al. The proportion of anemia associated with iron deficiency in low, medium, and high human development index countries: a systematic analysis of national surveys. **Nutrients**, v. 8, n. 11, p. 693, 2016.

PINHEIRO, Bruna; GOMES, Carolina; BALTAZAR, Ana Lúcia. O fitato e a biodisponibilidade de ferro nas leguminosas. **Acta Portuguesa de Nutrição**, v. 22, p. 48-51, 2020.

QUAGGIO, J. A.; CHIBA, M. K. (2022). Amostragem do solo para fins de fertilidade. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.

M. C. (Eds.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (Boletim Técnico 100), p. 17-27.

RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011, 420p.

RAM, H. et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and soil**, v. 403, p. 389-401, 2016.

RAMAKRISHNA, Wusirika; ROR, Pankaj; BENIWAL, Rahul. Innovative reduction of antinutrients from phytic acid. In: **Biofortification for nutrient-rich crops**. 1st ed. 2024. CRC Press. p. 16. ISBN 9781032690636.

RAMÍREZ CÁRDENAS, Lucía de Los Angeles. Biodisponibilidade de zinco e de ferro, valor nutricional e funcional de diferentes cultivares de feijão comum submetidos a tratamentos domésticos. 2006.

RAMÍREZ-CÁRDENASI, Lucía; LEONEL, Alda Jusceline; COSTA, Neuza Maria Brunoro. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. **Food Science and Technology**, v. 28, p. 200-213, 2008.

RENGEL, Zed. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 15, n. 2, p. 397-409, 2015.

RIOS, Sara de Almeida et al. Biofortificação: culturas enriquecidas com micronutrientes pelo melhoramento genético. **Revista Ceres**, v. 56, n. 6, p. 713-718, 2009.

ROSOLEM, Ciro A.; MARUBAYASHI, Osvaldo M. Seja o doutor do seu feijoeiro. **Informações agronômicas**, v. 68, n. 1, p. 1-16, 1994.

SALTZMAN, Amy et al. Biofortification: progress toward a more nourishing future. **Global food security**, v. 2, n. 1, p. 9-17, 2013.

SANTOS, José Eduardo Silva. Programa de biofortificação nos territórios desnutrição e insegurança alimentar. 2023.

SIDA-ARREOLA, Juan Pedro et al. Can biofortification of zinc improve the antioxidant capacity and nutritional quality of beans? **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 29, n. 3, p. 237, 2017.

SILVA, Osmira Fátima da et al. Impacto econômico da nova cultivar de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) BRS FP403 no sul do Brasil.

SRIVASTAV, Pooja et al. Biofortification—present scenario, possibilities and challenges: a scientometric approach. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11632, 2022.

STRAETEN, Van Der Dominique et al. Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 5203, 2020.

TEFERA, Gezahegn. Evaluation and genetic analysis of common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) at Dibatie and Mandura, Northwestern Ethiopia. *Journal of Agricultural Science and Food Technology*, v. 7, n. 5, p. 82-90, out. 2021.

TEIXEIRA, André Luiz Gomes et al. Anemia ferropriva: aspectos clínicos, diagnósticos e terapêuticos. **Revista de Medicina**, v. 103, n. 2, 2024.

UMEDA, Wellington Mamoro. Caracterização nutricional, capacidade antioxidante e compostos bioativos de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). 2017.

UNITED NATIONS; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). FAO/INFOODS/IZiNCG global food composition database for phytate - version 1.0 (PhyFoodComp1.0): user guide. Rome: FAO, 2019.

U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. FoodData Central: Beans, raw (Common, *Phaseolus vulgaris*). 2019. Disponível em: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/747436/nutrients>. Acesso em: 15 out. 2024.

VALDÉS, Samanta Thomas et al. O efeito de genótipos de feijão e das formas usuais de preparo sobre a atividade antioxidante e a composição nutricional. 2010.

VIDAK, Monika et al. New Age of Common Bean. In: **Production and Utilization of Legumes-Progress and Prospects**. IntechOpen, 2023.

VIEIRA, Joice Caroline Rocha; CLAROS-MG, Montes. **AGRICULTURA NO COMBATE A FOME OCULTA**, 2022.

WELCH, Ross M.; GRAHAM, Robin D. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 18, n. 4, p. 299-307, 2005.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium,

magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*, Lancaster, v. 182, n. 1, p. 49-84, Apr. 2009.

Wutke, E. B.; Chiorato, A. F.; Esteves, J. A. F.; Carbonell, S. A. M.; Ambrosano, E. J.; Lemos, L. B.; Soratto, R. P.; Arf, O.; Cantarella, H. Capítulo 3.8: Manejo de nutrientes. In: Quaggio, J. A.; Cantarella, H.; Zambrosi, F. C. B. (Org.). ***Boletim 100: Manejo de Solo para Culturas Temporárias***. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2022. p. 246-249.

YAMAGISHI, Jessica Akemi et al. Anemia ferropriva: diagnóstico e tratamento. ***Revista científica da faculdade de educação e meio ambiente***, v. 8, n. 1, p. 99-110, 2017.

YOUSEFI, Zahra; SHARIFI, Peyman; RABIEE, Mohammad. Effect of foliar application of zinc and iron on seed yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris*). ***AGRIVITA Journal of Agricultural Science***, v. 45, n. 1, p. 154-162, 2023.