

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E
INOVAÇÃO**

CENTRO DE EXCELÊNCIA EM BIOINSUMOS

COORDENAÇÃO DE CAPACITAÇÃO EM BIOINSUMOS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *lato sensu* EM BIOINSUMOS

IF GOIANO CAMPUS RIO VERDE

DANILO AUGUSTO SILVESTRE

**ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO
COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL**

**RIO VERDE - GO
2025**

DANILO AUGUSTO SILVESTRE

**ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO
COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL**

Monografia apresentada à Banca
Examinadora do Curso de Bioinsumos do
Instituto Federal Goiano como exigência
parcial para obtenção do título de Especialista
em Bioinsumos

Orientadora: Ma. Germana Gouveia Tavares

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S587e Silvestre, Danilo Augusto
Economia da fixação biológica de nitrogênio em espécies de
feijão comum, caupi e mungo no Brasil / Danilo Augusto
Silvestre. Rio Verde 2026.
20f. il.
Orientadora: Prof^ª. Ma. Germana Gouveia Tavares.
Monografia (Especialista) - Instituto Federal Goiano, curso de
0230426 - Especialização em Bioinsumos - Rio Verde (Campus
Rio Verde).
I. Título.

Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – CEBIO/IF Goiano

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos onze dias do mês de setembro de dois mil e vinte e cinco, às 16 horas e 35 minutos, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Profa. Germanna Gouveia Tavares (orientadora), Dra. Caroline Muller (membro externo) e Dra. Ketley Santos Sousa (membro externo), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL” de DANILO AUGUSTO SILVESTRE, estudante do curso de Especialização em Bioinsumos do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2024102304260022. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 11 de setembro de 2025.

(Assinado eletronicamente)

Germanna Gouveia Tavares

Orientador(a)

(Assinado eletronicamente)

Caroline Muller

Membro da Banca Examinadora

(Assinado eletronicamente)

Ketley Santos Sousa

Membro da Banca Examinadora

ECONOMIA DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM ESPÉCIES DE FEIJÃO COMUM, CAUPI E MUNGO NO BRASIL

Monografia apresentada à Banca Examinadora do Curso de Bioinsumos - Campus Rio Verde do IF Goiano como exigência parcial para a obtenção do título de Especialista em Bioinsumos.

Rio Verde, GO, 11 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA BANCA EXAMINADORA

.....
Ma. Germanna Gouveia Tavares
Orientadora (IF Goiano)

.....
Dra. Caroline Muller Amaral
Membro da Banca Examinadora (IF Goiano)

.....
Ma. Ketlyn Santos Sousa
Membro da Banca Examinadora (IF Goiano)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria concedidas ao longo desta jornada.

À minha orientadora, pela dedicação, paciência, orientação e ensinamentos transmitidos, fundamentais para a construção deste trabalho.

Aos meus amigos, pela compreensão, parceria e palavras de encorajamento, que tornaram esta trajetória mais leve e significativa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Bioinsumos, pela oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

Às instituições de apoio FAPEG, FUNAPE, IF Goiano e CEBIO, pelo suporte indispensável ao desenvolvimento desta pesquisa.

BIOGRAFIA DO ALUNO

Danilo Augusto Silvestre é natural de Londrina, Paraná. Graduado em Agronomia pela Universidade Estadual de Londrina (UEL), concluiu o Mestrado e o Doutorado em Agronomia (Ciências do Solo) na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), em cooperação com a Embrapa Agrobiologia. Realizou estágio de doutorado sanduíche na University of New Brunswick, Canadá, e estágios de pós-doutorado em Agronomia na Universidade Estadual de Londrina e no Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde.

RESUMO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um fator-chave para garantir a sustentabilidade da produção agrícola e a segurança alimentar. Este estudo teve como objetivo estimar a economia gerada pela FBN em feijão comum (*Phaseolus vulgaris*), feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e feijão-mungo (*Vigna radiata*). Os dados de área, produção e produtividade das culturas deste estudo foram obtidos dos censos agropecuários brasileiros de 2006 e 2017. Estimamos a quantidade de N (ureia) necessária para produzir 1000 kg de grãos de cada espécie de feijão na ausência de inoculação. A contribuição da FBN para o suprimento de N de cada espécie de leguminosa foi obtida a partir de estudos utilizando o método da abundância natural de ^{15}N . Os benefícios econômicos gerados pela FBN foram de US\$ 6 milhões com feijão-mungo, US\$ 59 milhões com feijão-caupi e US\$ 119 milhões com feijão-comum, em 2017. A economia gerada pela FBN por hectare plantado com feijão-comum em 2017 aumentou 40% em comparação com 2006, principalmente devido ao aumento significativo de 64% na produtividade de grãos dessa cultura. Entre 2006 e 2017, a FBN manteve o feijão comum como principal espécie mitigadora de CO₂e, com valores estáveis em torno de 1,2 milhão tCO₂e. Em contraste, o caupi apresentou queda expressiva, de 1,22 milhão para 0,50 milhão tCO₂e, enquanto o mungo reduziu de 167 mil para apenas 46 mil tCO₂e, evidenciando forte retração na contribuição dessas espécies ao longo do período. Esse estudo destaca a importância da FBN na produção dessas espécies de leguminosas, o que permite a redução do uso de fertilizantes nitrogenados, aumento da economia e redução nas emissões de gases de efeito estufa nesses sistemas de produção, contribuindo para a sustentabilidade da produção agrícola.

Palavras-chave: Valoração econômica. Mitigação de gases de efeito estufa. *Bradyrhizobium*. *Rhizobium*

ABSTRACT

Biological nitrogen fixation (BNF) is a key factor in ensuring the sustainability of agricultural production and food security. This study aimed to estimate the economic savings generated by BNF in common bean (*Phaseolus vulgaris*), cowpea (*Vigna unguiculata*), and mung bean (*Vigna radiata*) production systems. Data on crop area, production, and productivity were obtained from the Brazilian Agricultural Censuses of 2006 and 2017. We estimated the amount of N (as urea) required to produce 1,000 kg of grain for each bean species in the absence of inoculation. The contribution of BNF to the N supply of each legume species was obtained from studies using the ¹⁵N natural abundance method. The economic benefits generated by BNF reached US\$ 6 million for mung bean, US\$ 59 million for cowpea, and US\$ 119 million for common bean in 2017. The savings generated by BNF per hectare cultivated with common bean increased by 40% in 2017 compared with 2006, mainly due to the significant 64% increase in grain yield of this crop. Between 2006 and 2017, BNF maintained common bean as the main CO₂e-mitigating species, with stable values around 1.2 million tCO₂e. In contrast, cowpea showed a marked decline, from 1.22 million to 0.50 million tCO₂e, while mung bean decreased from 167 thousand to only 46 thousand tCO₂e, indicating a substantial reduction in the contribution of these species over the study period. This study highlights the importance of BNF in the production of these legume species, enabling reductions in nitrogen fertilizer use, increasing economic savings, and reducing greenhouse gas emissions in these production systems, thereby contributing to the sustainability of agricultural production.

Keywords: Economic valuation. Greenhouse gas mitigation. *Bradyrhizobium*. *Rhizobium*.

LISTA DE TABELAS/ ILUSTRAÇÕES

TABELA 1 - Variáveis utilizadas para estimar a economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

TABELA 2 - Variáveis utilizadas para estimar a mitigação de CO₂e gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

TABELA 3 - Economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio em espécies de feijões cultivadas no Brasil, em 2006 e 2017 (US\$).

TABELA 4 - Contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente (tCO₂e) e (kg CO₂e ha⁻¹) resultantes da produção de espécies de feijões no Brasil, durante as safras de 2013-2014 a 2022-2023.

ANEXO 1 - Área e produção de grãos de feijões no Brasil em 2006 e 2017.

ANEXO 2 - Preço da tonelada de ureia em cada unidade da federação (em R\$) e preços médios pagos pela ureia no Brasil em 2006 e 2017.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	4
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
5.	CONCLUSÃO	14
6.	REFERÊNCIAS.....	14
7.	ANEXOS.....	19

1. INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento populacional representa um desafio global significativo (Tian; Bryksa; Yada, 2016), especialmente em relação à demanda crescente por alimentos e à sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Omomowo; Babalola, 2021). Nesse contexto, a agricultura moderna depende fortemente de fertilizantes químicos, cujos mercados apresentam elevada volatilidade econômica e forte dependência geopolítica. Conflitos internacionais e instabilidades no mercado global podem comprometer a oferta e aumentar os preços desses insumos agrícolas, incluindo fertilizantes nitrogenados (Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023; Vos et al., 2025), impactando diretamente os custos de produção e a estabilidade da produção de alimentos.

Diante desse cenário, a agricultura sustentável torna-se fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e garantir sistemas produtivos mais resilientes, integrando aspectos econômicos, sociais e ambientais (Araujo; Urbano; González-Andrés, 2020; Paudyal; Gupta, 2018; Soratto et al., 2022). Entre as estratégias sustentáveis disponíveis, destaca-se a fixação biológica de nitrogênio (FBN), processo realizado por bactérias diazotróficas capazes de converter o N_2 atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas. A FBN reduz a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos e representa uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável para os sistemas agrícolas (Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Além de reduzir o uso de insumos externos, a FBN contribui para o restabelecimento do acoplamento entre os ciclos do carbono e do N nos agroecossistemas (Dos Santos Sousa et al., 2022a; Kebede, 2020; Louarn et al., 2015). Em sistemas agrícolas de baixo uso de insumos, especialmente em pequenas propriedades rurais ou em sistemas orgânicos, a FBN pode representar a principal fonte de N disponível às culturas (Sant'Anna et al., 2018). Nesse sentido, a contribuição da FBN em leguminosas constitui um importante serviço ecossistêmico, promovendo maior eficiência no uso de nutrientes e reduzindo os impactos ambientais associados ao uso intensivo de fertilizantes nitrogenados (Kebede, 2020; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Na década de 1990, estimou-se que a FBN contribuiu com aproximadamente 145 Tg de N por ano para os ecossistemas terrestres, sendo cerca de 35 Tg destinados à agricultura (Gruber; Galloway, 2008). Mais recentemente, (Herridge et al., 2022) estimaram que as leguminosas de grãos fixaram globalmente 35,5 Tg de N em 2018, dos quais 25,0 Tg foram provenientes da soja (*Glycine max*), 7,2 Tg das pulses e 3,3 Tg do amendoim (*Arachis hypogaea*). Esses resultados evidenciam a importância estratégica da FBN para a sustentabilidade da produção agrícola global.

Embora a soja represente o exemplo mais expressivo do sucesso da FBN em sistemas agrícolas tropicais, outras leguminosas alimentares também apresentam elevado potencial para

geração de benefícios econômicos e ambientais associados à simbiose com bactérias diazotróficas. Entre elas, destacam-se o feijão-comum, o feijão-caupi e o feijão-mungo, importantes fontes de proteínas e minerais para populações da África, Ásia e América Latina (Karavidas et al., 2022).

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) (FAO, 2024), cultura que vem passando por intensos avanços tecnológicos voltados ao aumento da produtividade e da eficiência do uso de N. O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*), importante leguminosa originária da África, é amplamente cultivado por pequenos produtores das regiões Norte e Nordeste do Brasil, além de apresentar crescente expansão no Cerrado em sucessão à soja (Silva Júnior et al., 2018). Em contraste, o feijão-mungo (*Vigna radiata*), originário da Índia e amplamente cultivado na Ásia (Mohan Naik; Abhirami; Venkatachalapathy, 2020), ainda apresenta cultivo incipiente no Brasil, embora possua elevado potencial agrônomico e comercial.

Diversos estudos demonstram que o feijão-comum (De Oliveira et al., 2025; Dos Santos Sousa et al., 2022; Ferreira; Silva; Wander, 2020), o feijão-caupi (Galindo et al., 2020; Kyei-Boahen et al., 2017) e o feijão-mungo (Alene; Raffi; Tiruneh, 2020; Mahmood et al., 2021; Singh et al., 2021), quando inoculados com rizóbios eficientes, podem alcançar produtividades semelhantes às obtidas com fertilização nitrogenada mineral. Contudo, esses resultados dependem das condições edafoclimáticas, da eficiência simbiótica das cepas inoculadas e da adaptação genotípica das culturas (Pacheco et al., 2020).

Apesar da reconhecida importância agrônômica da FBN, estudos voltados à valoração econômica desse processo e à quantificação de seus benefícios ambientais ainda são escassos, especialmente em leguminosas alimentares (Döbereiner, 1997; Tauer, 1989; Telles; Nogueira; Hungria, 2023). Estimativas dessa natureza são fundamentais para subsidiar políticas públicas relacionadas à segurança alimentar, sustentabilidade agrícola e mitigação das mudanças climáticas.

No caso da soja, estimativas indicam que aproximadamente 68% do N utilizado pela cultura pode ser proveniente da FBN (Peoples et al., 2009), podendo alcançar valores próximos de 78% no Brasil (Peoples et al., 2021). Em termos econômicos, (Döbereiner, 1997) estimou que a FBN gerava aproximadamente US\$ 3,2 bilhões anuais para a produção de soja no início da década de 1990. Posteriormente, (Telles; Nogueira; Hungria, 2023) reportaram que esse benefício aumentou para US\$ 7,2 bilhões na safra 2009-2010 e para US\$ 15,2 bilhões na safra 2019-2020, evidenciando o crescimento da importância econômica da FBN nos sistemas agrícolas brasileiros. Em sistemas de produção de cana-de-açúcar, estimativas recentes indicaram que a FBN natural associada a bactérias diazotróficas contribuiu com benefícios econômicos acumulados de aproximadamente US\$ 15,7 bilhões ao longo de dez safras agrícolas, com economia média de US\$ 183 ha⁻¹ ano⁻¹ associada à redução da dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Silvestre et al., 2026).

Portanto, o objetivo deste estudo foi estimar os benefícios econômicos e ambientais associados à fixação biológica de nitrogênio em sistemas de produção de feijão-comum, feijão-caupi e feijão-mungo no Brasil. Para isso, foi desenvolvida uma estrutura analítica baseada na contribuição da FBN para o suprimento de N dessas culturas, visando quantificar a economia associada à redução do uso de ureia e a mitigação potencial das emissões de CO₂ equivalente.

2. OBJETIVOS

Estimar os benefícios econômicos e ambientais gerada pelos serviços ecossistêmicos da fixação biológica de N na produção de feijão no Brasil.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Dados utilizados para estimar a economia da FBN

As estimativas da economia gerada pela FBN foram realizadas para feijão-comum [*Phaseolus vulgaris* L.], feijão-caupi [*Vigna unguiculata* Walp.], e feijão-mungo [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] no Brasil. Para essas estimativas, foram utilizados os seguintes dados: área cultivada, produção, produtividade (Anexo 1), custo da ureia (Anexo 2), eficiência da aplicação de ureia, quantidade de N necessária para produzir 1000 kg de cada tipo de feijão, N disponível no solo e contribuição da FBN para o fornecimento de N dos feijões.

Os censos agrícolas mais recentes, de 2006 e 2017, foram utilizados para garantir informações precisas e abrangentes. Os dados de área, produção e produtividade das três culturas de feijões consideradas neste estudo foram obtidos nos censos agrícolas brasileiros de 2006 e 2017, fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012; IBGE, 2019). Os dados sobre o custo da ureia foram obtidos junto à Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).

Para estimar a economia gerada pela FBN, considerou-se a quantidade de N (na forma de ureia) necessária para produzir 1000 kg de grãos de cada espécie de feijão sem inoculação. Além disso, foram utilizados dados de estudos de campo realizados no Brasil, com o método de abundância natural de ^{15}N , para determinar a contribuição da FBN para o fornecimento de N das diferentes espécies de leguminosas (Tabela 1).

Para determinar a quantidade de N necessária para produzir 1000 kg de grãos de cada espécie de feijão (na forma de ureia), conforme apresentado na Tabela 1, considerou-se o N acumulado na parte aérea da planta e nos grãos.

Tabela 1. Variáveis utilizadas para estimar a economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

k	e_k ¹	d	s ²	h	f_k ¹
Cultura	kg	%	kg ha ⁻¹	%	%
Feijão comum	64	50	30	46	54
Caupi	122	50	30	46	55
Mungo	79	50	30	46	54

k : diferentes tipos de feijões; e_k : N necessário para produzir 1.000 kg de grãos; d : eficiência de aplicação da ureia, sendo necessária dobrar a dose de N; s : N disponível para a planta; h : concentração média de N na ureia; f_k : contribuição da FBN em cada espécie. ¹ Cálculo baseado em (Da Silva Júnior et al., 2018; Duscaron et al., 2011; Hungria et al., 2006; Leite et al., 2022; Moreira; Oliveira; Ferreira, 2017; Pacheco et al., 2020; Santos (2020).

Também foi considerada a quantidade de N fornecida à planta por outras fontes, ou seja, pela mineralização da matéria orgânica do solo e por fertilizantes como fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP). Assim, determinou-se que o N proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo e dos fertilizantes pode fornecer aproximadamente 30 kg N ha⁻¹ (Hungria et al., 2006). Para essas estimativas, considerou-se uma eficiência de aplicação da ureia de 50% (Reetz Jr, 2016).

3.2 Avaliação econômica

As economias estimadas geradas pela FBN foram calculadas com base na quantidade equivalente de N na forma de ureia, que possui teor médio de N de 46%, aplicada como fonte de N. As economias geradas pela FBN foram estimadas utilizando a Eq. 1, adaptada da equação proposta por Telles et al., (2023):

$$Z_k = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^r \{ [(e_k \cdot m_{ijk}) - s] \cdot d \left(\frac{p_{ij}}{h} \cdot a_{ijk} \cdot f_k \right) \} \quad (1)$$

onde Z_k representa a economia (em US\$) para diferentes culturas de feijões k ($k = 1, k = 2, k = 3$), i representa os anos (2006: $i = 1$; 2017: $i = 2$), e j representa as diferentes regiões ($j = 1 \dots 27$ Unidades Federativas do Brasil). Z é a economia total (em US\$) gerada pela FBN no cultivo de feijões, e e_k é a quantidade de N necessária para produzir uma determinada quantidade (em kg) de cada espécie (k). A variável m_{ijk} é a produtividade de grãos (kg ha⁻¹) da k -ésima espécie no i -ésimo ano e na j -ésima região, e d_{ij} é a eficiência de aplicação da ureia (em %), considerando perdas devido à volatilização de amônia, desnitrificação e lixiviação. Portanto, assumindo que a eficiência da ureia é de 50%, é necessário sobrar a dose de N. O N já disponível para a planta (em kg N ha⁻¹), proveniente do N

disponível no solo, da mineralização da matéria orgânica e de fontes secundárias (exceto fertilizantes nitrogenados), como fosfato diamônico (DAP) e fosfato monoamônico (MAP), é representado por s . O preço da ureia (em US\$ por kg) no i -ésimo ano e j -ésima região é representado por p_{ij} , e h representa a concentração média de N na ureia. A área cultivada com a k -ésima espécie no i -ésimo ano e j -ésima região (em ha) é representada por a_{ijk} , e f_k é a contribuição da FBN para a k -ésima espécie. A Tabela 1 contém as variáveis utilizadas para estimar a economia gerada pela FBN nas culturas de feijões.

Os valores monetários foram corrigidos para junho de 2023 com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), que é o índice oficial de inflação do Brasil. Os valores corrigidos foram convertidos em dólares em 30 de junho de 2023 [US\$1 = R\$4,90] (BCB, 2023).

3.4 Estimativa de mitigação de CO₂ equivalente

A estimativa de mitigação de CO₂ equivalente proporcionada pela FBN foi baseada na quantidade equivalente de ureia necessária para a produção de cada espécie de feijão sem FBN. Assumiu-se que a 1 kg de N estão associadas emissões totais de 14.41 kg de CO₂ equivalente (CO₂-e), considerando tanto o processo de síntese industrial quanto a aplicação dos fertilizantes nitrogenados na agricultura (Menegat; Ledo; Tirado, 2022). Além disso, assume-se que 1% do N proveniente de fertilizantes é perdido na forma de N₂O, além das emissões indiretas desse gás resultantes da nitrificação e desnitrificação no solo, estimadas entre 0.25% e 0.4% adicionais de N₂O (Telles; Nogueira; Hungria, 2023). Nesse sentido, foi utilizada um modelo matemático para mitigação (Equação 2), adaptada de Telles et al. (2023). A Tabela 2 contém as variáveis utilizadas para estimar a mitigação de CO₂ gerada pela FBN para as espécies de feijões.

$$Y_k = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \{ [(m_{ijk} \cdot e) - s] \cdot d \cdot a_{ijk} \cdot c \cdot f_k \} \quad (\text{Equação 2})$$

onde: onde Y_k representa a mitigação de CO₂ (em kg) gerado pela FBN diferentes culturas de feijões k ($k = 1, k = 2, k = 3$), i representa os anos (2006: $i = 1$; 2017: $i = 2$), e j representa as diferentes regiões ($j = 1 \dots 27$ Unidades Federativas do Brasil). Z é a mitigação total de CO₂ (em kg) gerado pela FBN no cultivo dos feijões, e e_k é a quantidade de N necessária para produzir uma determinada quantidade (em kg) de cada espécie (k). e_k é o N necessário para produzir uma determinada quantidade (em kg) de cada espécie (k). A variável m_{ijk} corresponde à produtividade de grãos (kg ha⁻¹) da k -ésima espécie no i -ésimo ano e na j -ésima região. O d_{ij} representa a eficiência de aplicação da ureia (em %), uma vez que ocorrem perdas por volatilização de amônia, desnitrificação e lixiviação. Portanto, assumindo-se que a eficiência da aplicação de ureia é de 50%, é necessário dobrar a dose de N. O N

já disponível para a planta (em kg N ha^{-1}), proveniente do N disponível no solo, da mineralização da matéria orgânica e de fontes secundárias (exceto fertilizantes nitrogenados), como fosfato diamônico (DAP) e fosfato monoamônico (MAP), é representado por s . A área cultivada com a k -ésima espécie no i -ésimo ano e na j -ésima região (em ha) é representada por a_{ijk} , e f_k é a contribuição da FBN para a k -ésima espécie.

Tabela 2. Variáveis utilizadas para estimar a mitigação de CO_2e gerada pela fixação biológica de nitrogênio (FBN) em espécies de feijões.

k	e_k ¹	d	s ²	C ³	f_k ¹
Cultura	kg	%	kg ha^{-1}		%
Feijão comum	64	50	30	14,41	54
Caupi	122	50	30	14,41	55
Mungo	79	50	30	14,41	54

k : diferentes tipos de feijões; e_k : N necessário para produzir 1.000 kg de grãos; d : eficiência de aplicação da ureia, sendo necessária dobrar a dose de N; s : N disponível para a planta; C : 1 kg de N estão associadas emissões totais de 14.41 kg de CO_2 equivalente ($\text{CO}_2\text{-e}$); f_k : contribuição da FBN em cada espécie. ¹Cálculo baseado em Silva Júnior et al. (2018), Pacheco et al. (2020), Leite et al. (2022), Santos (2020), Moreira et al., (2017) e Delic et al., (2011). ²Hungria et al., (2006). ³(Menegat; Ledo; Tirado, 2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio

Os resultados demonstram que a fixação biológica de nitrogênio (FBN) representa um importante serviço ecossistêmico e fonte de capital natural para os sistemas de produção de feijão no Brasil, gerando benefícios econômicos expressivos por meio da redução da dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos. Em 2017, as economias associadas à FBN foram estimadas em aproximadamente US\$ 119 milhões para o feijão-comum, US\$ 59 milhões para o feijão-caupi e US\$ 6 milhões para o feijão-mungo, evidenciando a relevância econômica desse processo para a agricultura brasileira (Tabela 3). A FBN tem sido reconhecida como uma prática agrícola sustentável capaz de reduzir os custos de produção e aumentar a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Döbereiner, 1997; Gruber; Galloway, 2008; Kebede, 2020; Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

As diferenças observadas entre espécies estiveram diretamente associadas à área cultivada e à produtividade das culturas (Anexo 1). Em 2006, o feijão-caupi apresentou maiores benefícios econômicos devido à maior área cultivada, enquanto em 2017 o feijão-comum passou a apresentar

maior contribuição econômica em decorrência do aumento de aproximadamente 64% da produtividade de grãos. Esse resultado está de acordo com (Mantovani; Plassa; Telles, 2024), que destacam mudanças espaciais e econômicas no cultivo de feijões no Brasil associadas à substituição de áreas e intensificação tecnológica. Adicionalmente, a redução de 57% e 77% nas áreas cultivadas com feijão-caupi e feijão-mungo, respectivamente, contribuiu diretamente para a redução dos benefícios econômicos gerados pela FBN nessas culturas.

Os resultados também evidenciam que os benefícios econômicos da FBN são influenciados pela dinâmica do mercado de fertilizantes (Anexo 2). Entre 2006 e 2017, o preço médio da ureia no Brasil reduziu aproximadamente 21%, diminuindo parcialmente o valor monetário estimado da FBN no período. Esse resultado reforça observações anteriores de que a volatilidade dos preços de fertilizantes e conflitos geopolíticos podem impactar significativamente os custos de produção agrícola e a valoração econômica da FBN (Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023).

Do ponto de vista agrônomo, os resultados confirmam a elevada contribuição da FBN para o suprimento de N das leguminosas avaliadas, com participação média próxima de 54-55% do N acumulado nas plantas. Valores semelhantes já foram reportados em estudos utilizando abundância natural de ^{15}N para feijão-comum (Leite et al., 2022; Pacheco et al., 2020) (Pacheco et al., 2020; Leite et al., 2022), feijão-caupi (Da Silva Júnior et al., 2018)(Silva Júnior et al., 2018) e feijão-mungo (Favero et al., 2022a, 2022b). Entretanto, a literatura demonstra ampla variabilidade nesses valores em função do genótipo, eficiência simbiótica, manejo e condições edafoclimáticas (Belane; Dakora, 2009, 2010, 2011), indicando potencial para ampliar os benefícios da FBN mediante seleção de genótipos, uso de estirpes mais eficientes e adoção de boas práticas agronômicas.

Em resumo, os resultados reforçam que a FBN constitui um importante serviço ecossistêmico capaz de gerar benefícios econômicos, agrônômicos e ambientais, reduzindo a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos e aumentando a sustentabilidade dos sistemas de produção de leguminosas. A adoção de inoculantes e tecnologias voltadas ao aumento da eficiência simbiótica pode ampliar ainda mais esses benefícios, fortalecendo a agricultura de baixo carbono e a segurança alimentar (Araujo; Urbano; González-Andrés, 2020; Herridge et al., 2022; Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023) .

Tabela 3. Economia gerada pela fixação biológica de nitrogênio em espécies de feijões cultivadas no Brasil, em 2006 e 2017 (US\$).

Estado	2006							2017						
	US\$				US\$ ha ⁻¹			US\$				US\$ ha ⁻¹		
	F. comum	Caupi	Mungo	Total	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo	Total	F. comum	Caupi	Mungo
Acre	713,066	1,266,008	66,648	2,045,722	103	184	95	45,733	77,931	7,188	130,852	37	72	49
Alagoas	10,845,085	5,010,229	3,012,140	18,867,454	41	35	99	650,839	484,810	180,883	1,316,531	23	54	40
Amapá	-	9,964	4,694	14,658		67	124	210	14,852	7,104	22,167	42	95	120
Amazonas	72,762	817,135	177,270	1,067,166	37	122	71	16,278	41,150	19,227	76,655	56	98	57
Bahia	21,987,598	41,970,943	10,194,787	74,153,329	91	115	63	3,875,645	7,485,402	750,839	12,111,886	43	62	26
Ceará	7,534,648	61,485,506	3,519,960	72,540,114	81	94	57	68,498	9,274,825	470,666	9,813,990	20	34	36
Distrito Federal	2,123,066	287,998	11,146	2,422,210	162	259	149	2,382,172	844,174	334,361	3,560,707	178	186	196
Espírito Santo	1,052,365	69,975	7,809	1,130,148	51	100	61	773,731	64,735	4,803	843,269	50	126	94
Goiás	7,841,640	1,432,966	477,366	9,751,972	149	259	203	16,735,487	2,705,217	16,057	19,456,761	179	217	99
Maranhão	1,974,455	3,403,942	2,802,979	8,181,376	32	133	65	63,779	2,232,570	301,067	2,597,416	25	88	38
Mato Grosso	1,470,938	1,243,743	283,851	2,998,531	122	227	187	7,694,685	19,359,396	921,514	27,975,595	111	149	117
Mato Grosso do Sul	1,017,747	256,466	17,978	1,292,191	88	186	74	921,533	61,929	10,439	993,902	99	111	85
Minas Gerais	20,671,463	6,851,858	1,165,898	28,689,218	95	156	105	31,948,378	1,341,616	294,715	33,584,710	135	93	54
Pará	1,345,842	5,134,908	1,517,990	7,998,740	54	141	62	237,203	1,031,373	164,643	1,433,219	88	106	57
Paraíba	2,156,796	14,583,777	2,429,176	19,169,749	41	73	64	270,928	1,532,385	655,102	2,458,416	16	27	56
Paraná	35,106,686	1,557,541	332,990	36,997,218	111	183	79	25,866,905	146,855	173,575	26,187,335	111	179	190
Pernambuco	7,025,370	16,797,267	3,087,727	26,910,364	51	70	63	868,980	1,881,959	455,077	3,206,016	22	30	37
Piauí	-	16,937,609	2,248,617	19,186,227		74	44	22,840	5,343,943	39,541	5,406,324	16	36	21
Rio de Janeiro	516,152	263,060	100,773	879,985	110	281	222	99,301	131,790	5,544	236,636	85	249	105
Rio Grande do Norte	785,862	14,014,748	85,639	14,886,249	57	90	47	33,015	1,227,703	673,982	1,934,701	22	35	51
Rio Grande do Sul	8,100,961	46,879	39,231	8,187,071	43	137	70	4,130,836	95,775	15,126	4,241,737	82	228	113
Rondônia	1,197,328	2,711,296	809,847	4,718,471	17	122	126	173,951	30,521	11,260	215,731	66	86	68
Roraima	8,364	22,886	24,749	55,999	72	98	53	58,791	504,531	35,697	599,019	212	143	75
Santa Catarina	14,166,505	248,733	236,232	14,651,470	116	191	131	6,425,606	7,130	14,457	6,447,192	111	188	117
São Paulo	13,137,100	7,101,841	1,759,367	21,998,309	183	331	254	15,292,998	252,747	160,861	15,706,605	187	168	126
Sergipe	1,360,412	1,547,661	519,387	3,427,460	59	101	41	209,362	107,086	90,072	406,520	54	71	56
Tocantins	248,334	263,703	57,592	569,629	143	75	53	365,348	2,402,150	92,030	2,859,528	58	123	80
Brasil=Σ	162,460,544	205,338,643	34,991,844	402,791,031	80	94	68	119,233,031	58,684,555	5,905,832	183,823,418	112	63	50

Fonte: elaborado com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - IBGE (2012; 2019). Observações: F.comum = *Phaseolus vulgaris*; Caupi = *Vigna unguiculata*; Mungo= *Vigna radiata*.

4.2 Mitigação de CO₂e

A fixação biológica de nitrogênio contribuiu significativamente para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente associadas à produção das espécies de feijões avaliadas. Em 2006, a mitigação total estimada foi de aproximadamente 2,60 milhões de tCO₂e, sendo 1,21 milhão tCO₂e provenientes do feijão-comum, 1,22 milhão tCO₂e do feijão-caupi e 167 mil tCO₂e do feijão-mungo (Tabela 4). Em 2017, a mitigação total reduziu para aproximadamente 1,80 milhão tCO₂e, refletindo principalmente a redução da área cultivada e da produção dessas leguminosas no Brasil.

O feijão-comum manteve-se como principal espécie mitigadora de CO₂e em 2017, com aproximadamente 1,23 milhão tCO₂e mitigados, resultado associado ao aumento da produtividade observado no período. Em contraste, o feijão-caupi e o feijão-mungo apresentaram forte retração em suas contribuições para mitigação climática, acompanhando a redução da área plantada dessas culturas.

A mitigação de CO₂e promovida pela FBN ocorre principalmente pela redução da necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos, cuja produção industrial demanda elevadas quantidades de combustíveis fósseis e energia. Além disso, menores doses de fertilizantes nitrogenados reduzem as emissões diretas e indiretas de N₂O provenientes do solo agrícola (Menegat; Ledo; Tirado, 2022; Silvestre et al., 2026; Telles; Nogueira; Hungria, 2023). Assim, a utilização de inoculantes eficientes representa uma estratégia relevante para agricultura de baixo carbono.

Comparativamente, os valores estimados neste estudo, embora relevantes, são inferiores aos reportados para a cultura da soja no Brasil. Telles; Nogueira; Hungria, (2023) estimaram mitigação próxima de 183 milhões tCO₂e associada à substituição de fertilizantes nitrogenados pela FBN na safra 2019-2020. Entretanto, apesar da menor magnitude absoluta observada nos feijões, os resultados evidenciam a relevância dessas culturas para a sustentabilidade agrícola, especialmente considerando sua importância para a segurança alimentar e para pequenos produtores rurais. De maneira semelhante, estimativas recentes em sistemas de produção de cana-de-açúcar indicaram mitigação acumulada próxima de 192 milhões de tCO₂e ao longo de dez safras agrícolas, associada à substituição parcial de fertilizantes nitrogenados sintéticos pela FBN (Silvestre et al., 2026).

No contexto global, aproximadamente 22% das emissões líquidas antropogênicas de gases de efeito estufa estão associadas ao setor AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use), que inclui agricultura, florestas e mudanças no uso da terra (IPCC, 2022). Dessa forma, tecnologias biológicas que reduzam a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos possuem elevado potencial estratégico para auxiliar no cumprimento das metas climáticas estabelecidas pelo Acordo de Paris

(ONU, 2015). Nesse sentido, os resultados deste estudo demonstram que a FBN em espécies de feijões representa não apenas um benefício agrônomo e econômico, mas também uma importante ferramenta para mitigação das mudanças climáticas e promoção da sustentabilidade agrícola.

Tabela 4. Contribuição da fixação biológica de nitrogênio (FBN) para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente (tCO₂e) e (kg CO₂e ha⁻¹) resultantes da produção de espécies de feijões no Brasil durante as safras de 2013-2014 a 2022-2023.

Estado	2006						2017					
	tCO ₂ e			Kg CO ₂ e ha ⁻¹			tCO ₂ e			Kg CO ₂ e ha ⁻¹		
	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo
Acre	4.250,574	9.986,701	370,115	616	1450	526	77,939	594,951	32,946	64	553	223
Alagoas	113.702,563	52.540,010	17.367,462	434	367	571	9.247,042	2.583,681	472,035	323	286	105
Amapá	-	34,048	31,437	-	230	827	0,654	136,604	73,270	131	876	1242
Amazonas	762,950	5.365,944	687,705	387	799	274	94,746	383,341	114,667	324	908	338
Bahia	124.011,082	278.748,616	34.800,833	513	764	216	19.319,349	61.539,891	11.938,068	213	510	412
Ceará	38.166,553	354.503,050	9.012,807	411	543	145	991,039	6.190,513	615,587	295	23	46
Distrito Federal	20.800,242	3.124,200	106,372	1584	2810	1418	22.559,306	8.051,706	3.246,556	1683	1772	1899
Espírito Santo	1.746,457	427,597	25,072	84	612	196	1.451,107	484,628	30,285	93	943	594
Goiás	74.860,958	15.540,954	4.955,927	1422	2813	2110	179.195,713	30.093,092	137,824	1913	2408	846
Maranhão	20.707,239	23.462,365	9.393,815	336	915	219	931,278	20.532,339	733,257	366	811	94
Mato Grosso	13.626,725	13.680,713	3.006,998	1129	2498	1978	94.623,349	257.933,876	11.537,871	1363	1988	1465
Mato Grosso do Sul	7.116,214	2.500,717	108,317	614	1815	448	8.444,655	596,156	87,650	904	1072	713
Minas Gerais	167.390,768	68.278,943	9.999,286	769	1557	903	309.169,433	10.784,545	1.341,949	1303	748	247
Pará	2.457,397	36.518,104	4.557,877	98	1005	187	2.103,157	9.999,255	983,709	777	1025	339
Paraíba	22.612,6239	58.452,465	7.712,192	430	295	203	3.851,606	21.767,100	3.831,966	229	389	327
Paraná	328.003,689	17.074,761	2.552,735	1035	2011	608	270.211,605	1.763,868	2.119,949	1154	2148	2322
Pernambuco	1.2720,254	69.801,749	10.648,379	93	293	216	12.734,105	27.568,566	851,270	323	436	68
Piauí	-	68.854,842	23.573,689	-	301	459	324,702	5.310,307	561,864	228	36	298
Rio de Janeiro	3423,380	2.411,635	882,722	732	2579	1949	861,245	1.618,451	53,941	734	3059	1018
Rio Grande do Norte	932,834	56.097,038	797,920	68	358	440	480,081	1.122,790	3.581,234	327	32	269

Rio Grande do Sul	1.7871,635	453,782	253,985	94	1323	452	43.291,570	1.349,269	182,100	859	3213	1359
Rondônia	12.572,750	17.839,635	5.484,315	177	803	853	1.237,492	263,887	82,327	469	741	496
Roraima	33,491	128,520	40,448	289	549	86	621,672	4.768,710	234,827	2244	1352	495
Santa Catarina	126.017,127	2.589,578	2.204,938	1035	1984	1220	73.949,850	94,092	169,557	1272	2476	1367
São Paulo	8.8965,617	55.968,550	13.163,732	1242	2609	1903	167.021,899	2.675,300	1.560,855	2041	1775	1218
Sergipe	3.972,031	9.376,881	5.598,966	174	611	443	1.146,138	807,165	524,622	293	538	325
Tocantins	1.792,959	1.092,419	95,229	1035	311	87	1.815,027	21.853,964	655,956	290	1117	569
Brasil = Σ	1.208.518,122	1.224.853,816	167.433,271	597	559	326	1.225.755,760	500.868,045	45.756,142	1150	539	386

5. CONCLUSÃO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) associada ao cultivo de feijão-comum, feijão-caupi e feijão-mungo gerou benefícios econômicos e ambientais relevantes para a agricultura brasileira. A substituição parcial de fertilizantes nitrogenados sintéticos pela FBN permitiu reduzir os custos associados ao uso de ureia e contribuiu significativamente para a mitigação das emissões de CO₂ equivalente nos sistemas produtivos avaliados.

Entre as espécies estudadas, o feijão-comum apresentou os maiores benefícios econômicos e ambientais em 2017, principalmente em função do aumento da produtividade de grãos, enquanto o feijão-caupi apresentou maior contribuição econômica em 2006 devido à maior área cultivada naquele período. Os resultados demonstram que a magnitude dos benefícios gerados pela FBN depende da interação entre eficiência simbiótica, produtividade agrícola e área cultivada.

Além da relevância econômica, a FBN constitui um importante serviço ecossistêmico ao reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos, diminuindo a demanda energética associada à produção industrial desses insumos e contribuindo para sistemas agrícolas mais sustentáveis e de menor emissão de gases de efeito estufa.

Portanto, a utilização de inoculantes eficientes com bactérias diazotróficas em leguminosas representa uma estratégia promissora para fortalecer a sustentabilidade da produção agrícola, aumentar a eficiência do uso de N e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas no Brasil.

6. REFERÊNCIAS

ALENE, Ayalew Addis; RAFFI, Mokula Mohammed; TIRUNEH, Kehali Jembere. Phosphorus use efficiency, yield and nodulation of mung bean (*Vigna radiata* L.) as influenced by the rate of phosphorus and Rhizobium strains inoculation in Metema district, Ethiopia. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 9, p. 1300–1315, 18 nov. 2020.

ARAUJO, Juan; URBANO, Beatriz; GONZÁLEZ-ANDRÉS, Fernando. Comparative environmental life cycle and agronomic performance assessments of nitrogen fixing rhizobia and mineral nitrogen fertiliser applications for pulses in the Caribbean region. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122065, 10 set. 2020.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa de câmbio**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

BELANE, Alphonsus K.; DAKORA, Felix D. Measurement of N₂ fixation in 30 cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes under field conditions in Ghana, using the ¹⁵N natural abundance technique. **Symbiosis**, v. 48, n. 1, p. 47–56, 1 fev. 2009.

BELANE, Alphonsus K.; DAKORA, Felix D. Symbiotic N₂ fixation in 30 field-grown cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) genotypes in the Upper West Region of Ghana measured using ¹⁵N natural abundance. **Biology and Fertility of Soils**, v. 46, n. 2, p. 191–198, 1 fev. 2010.

BELANE, Alphonsus K.; DAKORA, Felix D. Photosynthesis, symbiotic N and C accumulation in leaves of 30 nodulated cowpea genotypes grown in the field at Wa in the Guinea savanna of Ghana. **Field Crops Research**, v. 124, n. 3, p. 279–287, 20 dez. 2011.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações agropecuárias: preços de insumos**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações agropecuárias: safras: série histórica das safras: feijão total (1^a, 2^a e 3^a safras)**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 17 jan. 2024.

DA SILVA JÚNIOR, Elson B. *et al.* Rhizobium Inoculation of Cowpea in Brazilian Cerrado Increases Yields and Nitrogen Fixation. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 722–727, 2018.

DE OLIVEIRA, Karen Sinéia *et al.* Co-inoculation with *Rhizobium*, *Azospirillum*, and microalgae increases common bean yield and profitability. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 1, p. e21719, 2025.

DÖBEREINER, Johanna. Biological nitrogen fixation in the tropics: Social and economic contributions. **Soil Biology and Biochemistry**, International Symposium - Sustainable Agriculture for the Tropics: The Role of Biological Nitrogen Fixation. v. 29, n. 5, p. 771–774, 1 maio 1997.

DOS SANTOS SOUSA, Westefann *et al.* Effects of *Rhizobium* inoculum compared with mineral nitrogen fertilizer on nodulation and seed yield of common bean. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 3, p. 52, 2 jun. 2022.

DUSCARON *et al.* Effect of bradyrhizobial inoculation on growth and seed yield of mung bean in Fluvisol and Humofluvisol. **African Journal of Microbiology Research**, v. 5, n. 23, p. 3946–3957, 23 out. 2011.

FAVERO, Vinício Oliosi *et al.* *Bradyrhizobium* strains from Brazilian tropical soils promote increases in nodulation, growth and nitrogen fixation in mung bean. **Applied Soil Ecology**, v. 175, p. 104461, 1 jul. 2022.

FERREIRA, Enderson Petrônio de Brito; SILVA, Osmira Fátima da; WANDER, Alcido Elenor. Economics of rhizobia and azospirilla co-inoculation in irrigated common bean in commercial and family farming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01532, 2020.

GALINDO, Fernando S. *et al.* Technical and economic viability of cowpea co-inoculated with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. and nitrogen doses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 304–311, 2020.

GRUBER, Nicolas; GALLOWAY, James N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 293–296, jan. 2008.

HERRIDGE, David F. *et al.* Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes II. Coefficients, templates and estimates for soybean, groundnut and pulses. **Plant and Soil**, v. 474, n. 1, p. 1–15, 1 maio 2022.

HUNGRIA, Mariangela *et al.* Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: Contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 86, n. 4, p. 927–939, 10 out. 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006: segunda apuração: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. **Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.

KARAVIDAS, Ioannis *et al.* Agronomic Practices to Increase the Yield and Quality of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.): A Systematic Review. **Agronomy**, v. 12, n. 2, 20 jan. 2022.

KEBEDE, Erana. Grain legumes production and productivity in Ethiopian smallholder agricultural system, contribution to livelihoods and the way forward. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1722353, 1 jan. 2020.

REETZ JÚNIOR, H. F. Fertilizers and their efficient use. Paris: **International Fertilizer Industry Association**, 2016.

KYEI-BOAHEN, Stephen *et al.* Growth and Yield Responses of Cowpea to Inoculation and Phosphorus Fertilization in Different Environments. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 3 maio 2017.

LEITE, Rafael de Almeida *et al.* Co-inoculation of *Rhizobium* and *Bradyrhizobium* promotes growth and yield of common beans. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104356, 1 abr. 2022.

LOUARN, Gaëtan *et al.* The amounts and dynamics of nitrogen transfer to grasses differ in alfalfa and white clover-based grass-legume mixtures as a result of rooting strategies and rhizodeposit quality. **Plant and Soil**, v. 389, n. 1, p. 289–305, 1 abr. 2015.

MAHMOOD, Abid *et al.* Evaluation of Symbiotic Association between Various Rhizobia, Capable of Producing Plant-Growth-Promoting Biomolecules, and Mung Bean for Sustainable Production. **Sustainability**, v. 13, n. 24, 13 dez. 2021.

MANTOVANI, Gabriela Gomes; PLASSA, Wander; TELLES, Tiago Santos. Spatial and economic dynamics of bean crops in an important production hub in Brazil. **Outlook on Agriculture**, v. 53, n. 2, p. 189–202, 1 jun. 2024.

MENEGAT, Stefano; LEDO, Alicia; TIRADO, Reyes. Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 14490, 25 ago. 2022.

MOHAN NAIK, G.; ABHIRAMI, P.; VENKATACHALAPATHY, N. Mung Bean. *In*: MANICKAVASAGAN, A.; THIRUNATHAN, Praveena (Orgs.). **Pulses: Processing and Product Development**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 213–228.

MOREIRA, Leniany; OLIVEIRA, Ana; FERREIRA, Enderson. Nodulation, contribution of biological N₂ fixation, and productivity of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) inoculated with rhizobia isolates. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, p. 644–651, 20 jun. 2017.

OMOMOWO, Olawale Israel; BABALOLA, Olubukola Oluranti. Constraints and Prospects of Improving Cowpea Productivity to Ensure Food, Nutritional Security and Environmental Sustainability. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 22 out. 2021.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris sobre o clima. Brasília, 2025**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>. Acesso em: 18 ago. 2025.

PACHECO, Rafael Sanches *et al.* Differences in contribution of biological nitrogen fixation to yield performance of common bean cultivars as assessed by the ¹⁵N natural abundance technique. **Plant and Soil**, v. 454, n. 1, p. 327–341, 1 set. 2020.

PAUDYAL, Som Prasad; GUPTA, V. N. P. Substitution of chemical fertilizer nitrogen through *Rhizobium* inoculation technology. **Our Nature**, v. 16, n. 1, p. 43–47, 31 dez. 2018.

PEOPLES, M. B. *et al.* The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. **Symbiosis**, v. 48, n. 1, p. 1–17, 1 fev. 2009.

PEOPLES, Mark B. *et al.* Quantifying country-to-global scale nitrogen fixation for grain legumes: I. Reliance on nitrogen fixation of soybean, groundnut and pulses. **Plant and Soil**, v. 469, n. 1, p. 1–14, 1 dez. 2021.

SANT'ANNA, S. A. C. *et al.* Biological nitrogen fixation and soil N₂O emissions from legume residues in an Acrisol in SE Brazil. **Geoderma regional**, v. 15, p. e00196, 1 dez. 2018.

SANTOS, D. M. T. Inoculação de feijão-mungo (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) com estirpes comerciais de *Bradyrhizobium*: avaliação da produtividade no município de Campos dos Goytacazes-RJ. 2020. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/10696>. Acesso em: 17 jan. 2024.

SILVESTRE, Danilo Augusto *et al.* Economic and environmental contributions of biological nitrogen fixation in Brazilian sugarcane production. **Biomass and Bioenergy**, v. 211, p. 109174, 1 ago. 2026.

SINGH, Guriqbal *et al.* Growth, symbiotic traits, productivity and nutrient uptake as influenced by dose and time of nitrogen application and *Rhizobium* inoculation in mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 13, p. 1982–1992, 9 ago. 2021.

SORATTO, Rogério P. *et al.* Turning biennial into biannual harvest: Long-term assessment of Arabica coffee–macadamia intercropping and irrigation synergism by biological and economic indices. **Food and Energy Security**, v. 11, n. 2, p. e365, 2022.

TAUER, Loren W. Economic impact of future biological nitrogen fixation technologies on United States agriculture. **Plant and Soil**, v. 119, n. 2, p. 261–270, 1 out. 1989.

TELLES, Tiago Santos; NOGUEIRA, Marco Antonio; HUNGRIA, Mariangela. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 31, p. 103158, 1 ago. 2023.

TIAN, Jenny (Jingxin); BRYKSA, Brian C.; YADA, Rickey Y. Feeding the world into the future – food and nutrition security: the role of food science and technology†. **Frontiers in Life Science**, v. 9, n. 3, p. 155–166, 2 jul. 2016.

VOS, Rob *et al.* Global shocks to fertilizer markets: Impacts on prices, demand and farm profitability. **Food Policy**, v. 133, p. 102790, 1 maio 2025.

7 ANEXO

Anexo 1. Área e produção de grãos de feijões no Brasil em 2006 e 2017.

Estados	2006						2017					
	Área (ha)			Produção (t)			Área (ha)			Produção (t)		
	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo	F. comum	Caupi	Mungo
Acre	6,898	6,888	703	7,501	6,858	568	1,224	1,075	148	652	572	83
Alagoas	261,800	142,978	30,399	114,157	27,169	25,670	28,614	9,040	4,490	9,284	3,559	2,089
Amapá	-	148	38	-	54	40	5	156	59	3	109	82
Amazonas	1,972	6,719	2,506	766	4,427	1,511	292	422	339	232	302	222
Bahia	241,767	364,630	160,763	237,835	233,807	89,355	90,546	120,703	28,971	61,840	61,504	9,710
Ceará	92,755	652,532	62,237	81,798	343,776	30,965	3,359	268,993	13,257	995	69,347	5,535
Distrito Federal	13,132	1,112	75	27,039	1,889	115	13,407	4,544	1,710	28,934	5,281	3,290
Espírito Santo	20,750	699	128	11,480	393	69	15,565	514	51	8,753	377	44
Goiás	52,629	5,525	2,349	99,830	9,395	4,923	93,677	12,495	163	223,823	18,634	174
Maranhão	61,712	25,654	42,798	20,790	18,441	23,893	2,545	25,313	7,841	935	16,842	3,574
Mato Grosso	12,070	5,476	1,520	19,339	8,421	3,023	69,441	129,713	7,875	127,552	165,277	12,375
Mato Grosso do Sul	11,589	1,378	242	12,577	1,632	180	9,341	556	123	12,857	445	118
Minas Gerais	217,545	43,864	11,073	270,034	46,094	12,338	237,235	14,409	5,426	421,609	9,120	3,152
Pará	24,951	36,332	24,313	14,163	27,818	12,940	2,706	9,753	2,899	3,380	7,569	1,901
Paraíba	52,565	198,468	38,010	22,703	79,030	20,707	16,809	55,935	11,711	3,867	11,256	7,564
Paraná	316,788	8,489	4,202	477,809	10,917	3,672	234,066	821	913	381,010	1,114	2,071
Pernambuco	136,947	238,566	49,346	76,965	94,759	27,400	39,447	63,233	12,452	12,785	14,256	5,421
Piauí	-	228,463	51,339	-	91,785	19,174	1,425	148,417	1,883	326	39,242	457
Rio de Janeiro	4,674	935	453	5,628	1,477	890	1,174	529	53	1,415	967	64
Rio Grande do Norte	13,682	156,496	1,813	7,350	67,491	649	1,468	35,162	13,304	482	9,227	7,965
Rio Grande do Sul	190,178	343	562	107,089	319	420	50,403	420	134	67,091	801	199
Rondônia	71,031	22,220	6,426	12,623	14,689	6,901	2,638	356	166	2,479	224	130
Roraima	116	234	469	88	124	211	277	3,526	474	754	3,333	371
Santa Catarina	121,737	1,305	1,808	183,585	1,660	2,480	58,141	38	124	101,499	58	185
São Paulo	71,654	21,456	6,918	122,909	34,218	13,334	81,838	1,507	1,281	206,051	1,754	1,756
Sergipe	22,893	15,344	12,652	14,719	8,622	4,554	3,911	1,499	1,615	2984	786	1,040
Tocantins	1,732	3,514	1,089	2,612	1,429	491	6,265	19,561	1,152	4759	16,111	971
Brasil = Σ	2,023,567	2,189,768	514,231	1,951,389	1,136,694	306,473	1,065,819	928,690	118,614	1,686,351	458,067	70,543

Fonte: elaborado com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2012; 2019). F.comum = *Phaseolus vulgaris*; Caupi = *Vigna unguiculata*; Mungo = *Vigna radiata*.

Anexo 2. Preço da tonelada de ureia em cada unidade da federação (em US\$) e preços médios pagos pela ureia no Brasil em 2006 e 2017.

Estados	2006	2017
Acre	635.91	469.43
Alagoas	635.91	469.43
Amapá	635.91	469.43
Amazonas	635.91	469.43
Bahia	618.46	419.35
Ceará	616.24	461.05
Distrito Federal	525.14	550.63
Espírito Santo	613.47	591.56
Goiás	525.36	500.06
Maranhão	635.91	456.69
Mato Grosso	508.73	403.47
Mato Grosso do Sul	541.32	479.42
Minas Gerais	512.06	506.82
Pará	635.91	469.43
Paraíba	635.91	469.43
Paraná	491.44	454.08
Pernambuco	610.86	455.13
Piauí	635.91	469.43
Rio de Janeiro	613.47	469.43
Rio Grande do Norte	715.55	458.66
Rio Grande do Sul	506.24	411.84
Rondônia	635.91	469.43
Roraima	635.91	521.46
Santa Catarina	516.13	423.42
São Paulo	714.88	496.36
Sergipe	618.46	469.43
Tocantins	635.91	513.64
Média	601.59	474.00

Os valores corrigidos foram convertidos para dólares em 30 de junho de 2023 [US\$1 = R\$4,90] (BCB, 2023).