TEXTO PARA DISCUSSÃO

3151

BIOINSUMOS E SOLUBILIZAÇÃO BIOLÓGICA DE FOSFATO: GANHOS DE PRODUTIVIDADE E REDUÇÃO DE CUSTOS

BRUNO SANTOS ABREU CALIGARIS
JOSÉ EUSTÁQUIO RIBEIRO VIEIRA FILHO
CHRISTIANE ABREU DE OLIVEIRA PAIVA

60 ipea

TEXTO PARA DISCUSSÃO

3151
Rio de Janeiro, agosto de 2025

BIOINSUMOS E SOLUBILIZAÇÃO BIOLÓGICA DE FOSFATO: GANHOS DE PRODUTIVIDADE E REDUÇÃO DE CUSTOS[1]

BRUNO SANTOS ABREU CALIGARIS[2]
JOSÉ EUSTÁQUIO RIBEIRO VIEIRA FILHO[3]
CHRISTIANE ABREU DE OLIVEIRA PAIVA[4]

1. Este Texto para Discussão é baseado na dissertação de mestrado do autor Bruno Santos Abreu Caligaris (Caligaris, 2024).

2. Analista-tributário da Receita Federal do Brasil. *E-mail*: bcaligaris@hotmail.com.

3. Técnico de planejamento e pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais do Instituto de Pesquisa Econômica aplicada (Dirur/Ipea); e professor do Programa de Pós-Graduação em Políticas Públicas e Desenvolvimento do Ipea. *E-mail*: jose.vieira@ipea.gov.br.

4. Pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo. *E-mail*: christiane.paiva@embrapa.br.

Governo Federal

Ministério do Planejamento e Orçamento
Ministra Simone Nassar Tebet

ipea **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**

Fundação pública vinculada ao Ministério do Planejamento e Orçamento, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidenta
LUCIANA MENDES SANTOS SERVO

Diretor de Desenvolvimento Institucional
FERNANDO GAIGER SILVEIRA

Diretora de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia
LUSENI MARIA CORDEIRO DE AQUINO

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas
CLÁUDIO ROBERTO AMITRANO

Diretor de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais
ARISTIDES MONTEIRO NETO

Diretor de Estudos e Políticas Setoriais, de Inovação, Regulação e Infraestrutura
PEDRO CARVALHO DE MIRANDA

Diretora de Estudos e Políticas Sociais
LETÍCIA BARTHOLO DE OLIVEIRA E SILVA

Diretora de Estudos Internacionais
KEITI DA ROCHA GOMES

Chefe de Gabinete
ALEXANDRE DOS SANTOS CUNHA

Coordenadora-Geral de Imprensa e Comunicação Social
GISELE AMARAL DE SOUZA

Ouvidoria: https://www.ipea.gov.br/ouvidoria
URL: https://www.ipea.gov.br

Texto para Discussão

Publicação seriada que divulga resultados de estudos e pesquisas em desenvolvimento pelo Ipea com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 2025

Caligaris, Bruno Santos Abreu
Bioinsumos e solubilização biológica de fosfato : ganhos de produtividade e redução de custos / Bruno Santos Abreu Caligaris, José Eustáquio Ribeiro Vieira Filho, Christiane Abreu de Oliveira Paiva. – Rio de Janeiro: Ipea, 2025.
45 p.: il., gráfs., mapa. – (Texto para Discussão ; n. 3151).

Inclui Bibliografia.
ISSN 1415-4765

1. Solubilização Biológica de Fosfato. 2. Bioinsumos. 3. Fertilizantes. 4. Descarbonização. I. Vieira Filho, José Eustáquio Ribeiro. II. Paiva, Christiane Abreu de Oliveira. III. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. IV. Título.

CDD 338.1734

Ficha catalográfica elaborada por Elizabeth Ferreira da Silva CRB-7/6844.

Como citar:
CALIGARIS, Bruno Santos Abreu; VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira. **Bioinsumos e solubilização biológica de fosfato**: ganhos de produtividade e redução de custos. Rio de Janeiro: Ipea, ago. 2025. 45 p.: il. (Texto para Discussão, n. 3151). DOI: https://dx.doi.org/10.38116/td3151-port

JEL: O3; Q1; Q55; Q55

Versão atualizada em 18 de setembro de 2025.

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos).

Acesse: https://repositorio.ipea.gov.br/.

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério do Planejamento e Orçamento.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

ERRATA

Prezados/as leitores/as,

Após a publicação original deste texto em 7 de agosto de 2025, foram identificados pontos que necessitaram de correção. Em 18 de setembro de 2025, foram realizados ajustes na página 29, seção 4.

Agradecemos a compreensão e pedimos desculpas pelos eventuais transtornos causados.

SUMÁRIO

SINOPSE

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO 7

2 DIAGNÓSTICO DE MERCADO E TECNOLOGIAS POUPADORAS DE FERTILIZANTES 9

2.1 Mercado internacional 9

2.2 Fixação biológica de nitrogênio 12

2.3 SBF 17

3 METODOLOGIA 19

3.1 Revisão da literatura 19

3.2 Método de análise 20

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS 25

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 40

REFERÊNCIAS 42

SINOPSE

Este estudo estima o impacto econômico potencial da adoção, em larga escala, da solubilização biológica de fosfato (SBF) na cultura da soja no Brasil. A hipótese central é que a SBF pode representar um avanço na produção agrícola sustentável, trazendo ganhos de produtividade e redução de custos econômicos. A metodologia inclui a comparação de dados experimentais com parâmetros de políticas públicas voltadas ao fomento agrícola. Os resultados sugerem, por safra, que a adoção dessa tecnologia pode impulsionar a produtividade do cultivo de soja (em até R$ 28,5 bilhões), reduzir a necessidade de fertilização química (economia de até R$ 15,7 bilhões) e contribuir para a descarbonização do setor agrícola brasileiro (economia de até R$ 1 bilhão).

Palavras-chave: solubilização biológica de fosfato; bioinsumos; fertilizantes; descarbonização.

ABSTRACT

This study estimates the potential economic impact of large-scale adoption of Biological Phosphate Solubilization (BPS) in soybean crops in Brazil. The central hypothesis is that BPS can represent an advance in sustainable agricultural production, bringing productivity gains and reducing economic costs. The methodology includes a comparison of experimental data with parameters of public policies for agricultural development. The results suggest that the adoption of this technology can boost soybean crop productivity (up to R$ 28.5 billion), reduce the need for chemical fertilization (savings up to R$ 15.7 billion), and contribute to the decarbonization of the Brazilian agricultural sector (savings up to R$ 1 billion).

Keywords: biological phosphate solubilization; bioinputs; fertilizers; decarbonization.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira é considerada um caso de sucesso na economia mundial. O desenvolvimento e a diversificação produtiva foram responsáveis por gerar renda e emprego em diversos setores de atividades econômicas. Em termos produtivos, em 2023, o produto interno bruto (PIB) do agronegócio brasileiro atingiu a marca de R$ 2,7 trilhões (Cepea, 2024b). Esse volume é composto por quatro segmentos: i) insumos para a agropecuária, cuja contribuição foi de 5,6%; ii) a produção agropecuária, com participação de 27,7%; iii) a agroindústria de processamento, com representação de 23,3%; e iv) os serviços, com a maior participação, 43,3%. Conforme IBGE (2024b), o PIB da economia brasileira como um todo foi de R$ 10,9 trilhões em 2023. Assim, o agronegócio contribuiu com cerca de um quarto da produção interna de bens e serviços (23,9%) na economia como um todo.

Em relação ao mercado de trabalho, o agronegócio tem atuação relevante na economia brasileira. Em 2023, a população ocupada no setor foi de cerca de 28,3 milhões de pessoas, as quais estavam subdivididas em cinco segmentos: insumos (1,1% do contingente); produção agropecuária (29,1% da mão de obra); autoconsumo ou pessoas que produzem exclusivamente para o consumo próprio e de seu domicílio (18,7%); agroindústria (15,9%); e serviços (35,2%) (Cepea, 2024a). Conforme a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua), publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2024, a ocupação do mercado de trabalho geral do país foi de 105,7 milhões de pessoas ocupadas ao final de 2023 (IBGE, 2024a). Assim, o agronegócio correspondeu a 26,8% da força de trabalho no país.

No que tange à balança comercial, o agronegócio é setor-chave, uma vez que contribuiu, em 2023, com US$ 166,6 bilhões dos US$ 339,7 bilhões das exportações brasileiras, ou praticamente 49,0% do total. Em relação ao volume exportado, foram 193,0 milhões de toneladas de grãos (cerca de 64,5% da produção), além de outros produtos como carnes, sucos, açúcar, frutas, couro etc. (Brasil, 2024a). Há ainda que se destacar o acesso a mercados, cuja produção é exportada para 190 países (Abia, 2024).

Para alcançar esse destaque na produção, no emprego e no comércio internacional, o agronegócio passou a ser intensivo em insumos modernos: máquinas, equipamentos, mão de obra qualificada, variedades de alto rendimento, defensivos agrícolas, além de fertilizantes e outros insumos para a nutrição de plantas. Com o aumento da produção no campo, a demanda por insumos também cresceu, de maneira que é preciso importar muitos desses insumos. É o caso dos fertilizantes químicos.

Mesmo contando com clima favorável, terras agricultáveis, produtores inovadores e aparato institucional capaz de fomentar a difusão de ciência e tecnologia, existem desafios setoriais a serem respondidos. A baixa fertilidade natural do solo brasileiro é uma adversidade. Para compensar essa dificuldade e se transformar em um grande exportador de alimentos, o Brasil demandou muita pesquisa, inovação e tecnologia. Como exemplo, uma tecnologia amplamente utilizada foi a fertilização do solo com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) por meio de processos químicos (Bernardi, Machado e Silva, 2002).

Desde meados da década de 1990, o aumento da produção de grãos no Brasil esteve diretamente ligado à utilização em larga escala de diferentes insumos, notadamente os fertilizantes químicos. De acordo com Anda (2024), o Brasil não é um grande produtor, apesar de consumir cerca de 8% dos fertilizantes produzidos no mundo, atrás apenas da China, da Índia e dos Estados Unidos. Em 2023, o país importou mais de 80% do fertilizante demandado, em um mercado dominado por poucos fornecedores (Brasil, 2023).

Até 2000, a produção nacional de fertilizantes respondia por cerca de metade da demanda por esse insumo. Entretanto, à medida que a demanda cresceu, optou-se por políticas que promovessem o aumento da oferta de fertilizantes por meio da importação, e não por meio do aumento da capacidade nacional de produção. Houve, inclusive, retração da produção nacional nos últimos quinze anos (Brasil, 2023).

Por conta dos fatores mencionados, o Brasil procurou desenvolver estratégias para diminuir a dependência de fertilizantes químicos importados ou que, em associação a eles, aumentassem o rendimento, uma vez que a independência, mesmo relativa, na oferta de insumos pode tornar o agronegócio mais competitivo no mercado global e menos vulnerável às oscilações internacionais. E é exatamente isso que a utilização em larga escala de produtos biológicos para a solubilização biológica de fosfato (SBF) pode oferecer.

A SBF é um bioprocesso, a partir de microrganismos que possuem mecanismos específicos para liberação de fósforo solúvel do solo ou da matéria orgânica de forma biológica, o qual pode apresentar melhores resultados a partir de novas tecnologias que aumentam a eficiência na absorção do fosfato, seja na fertilização química, seja no estoque do nutriente no solo. Além de a maior eficiência na absorção do fosfato proporcionar uma economia de até 50% do fertilizante a ser utilizado, estudos sugerem um incremento médio de 10,5% da produtividade da soja.

Assim, este Texto para Discussão procura mensurar o potencial impacto dessa tecnologia. Para tanto, além desta breve introdução, são apresentadas mais quatro seções. A segunda faz um diagnóstico do mercado de fertilizantes. A terceira apresentará a abordagem metodológica. A quarta discutirá os resultados. Por fim, seguem-se as considerações finais e os comparativos com as políticas públicas.

2 DIAGNÓSTICO DE MERCADO E TECNOLOGIAS POUPADORAS DE FERTILIZANTES

2.1 Mercado internacional

O setor produtor de fertilizantes é concentrado em termos regionais, já que a disponibilidade dos recursos naturais se mostra de forma desigual no mundo. Em termos geográficos, os principais produtores de matérias primas para fertilizantes são: China (NPK), Rússia (NPK), Estados Unidos (NP), Índia (N), Marrocos (P), Canadá (K) e Bielorrússia (K). Os Estados Unidos e a Índia consomem sua própria produção. A China, que possui a maior produção, absorve parte do que produz, mas também é um grande exportador. Os demais grandes produtores são basicamente exportadores (Brasil, 2023).

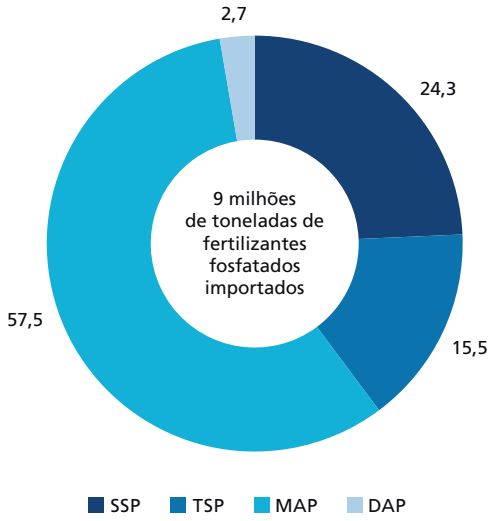
Para além da concentração regional, o setor é dominado por poucas empresas: Mosaic e CF Industries (Estados Unidos), Yara (Noruega), Nutrien (Canadá), Office Chérifien des Phosphates (OCP) (Marrocos), Belaruskali (Bielorrússia), Sinofert (China), Uralkali e Phosagro (Rússia), Eurochem (Suíça-Rússia), Saudi Basic Industries Corporation (Sabic) (Arábia Saudita), K+S (Alemanha) e Israel Chemicals Ltd (ICL) (Israel) (GlobalFert, 2022).

A concentração regional da produção de fertilizantes e a dependência comercial expõem o Brasil a crises externas, que podem impactar no preço e até mesmo no fornecimento do insumo no mercado doméstico. No pós-pandemia, a retomada econômica mundial, as restrições logísticas e a pressão pela produção de grãos levaram à elevação dos preços de diversos insumos agrícolas. A recomposição do preço do petróleo depois da baixa histórica, em 2020, influenciou o preço do frete das *commodities*. O mesmo ocorreu com a flutuação do preço do gás natural, em 2021. No mesmo ano, o furacão Ida afetou a produção desses insumos nos Estados Unidos. Nesse contexto, dois importantes exportadores de fertilizantes, Rússia e China, levantaram barreiras à exportação para, em tese, assegurar o atendimento de suas demandas internas.

Em 2022, os problemas se agravaram. A Bielorrússia passou a ser sancionada internacionalmente em decorrência de desrespeito a direitos humanos e foi impedida de escoar sua produção de potássio por portos da União Europeia (Caligaris *et al*., 2022). Logo em seguida, a guerra entre Rússia e Ucrânia influenciou o fornecimento e os preços de fertilizantes. Contratos de fornecimento não foram honrados, e a agricultura brasileira correu sério risco de não ser abastecida suficientemente. Sem fertilizantes, a produtividade do agronegócio não seria mantida, com consequências para o PIB, o emprego, a balança comercial e a segurança alimentar do Brasil (Ogino, Gasques e Vieira Filho, 2023).

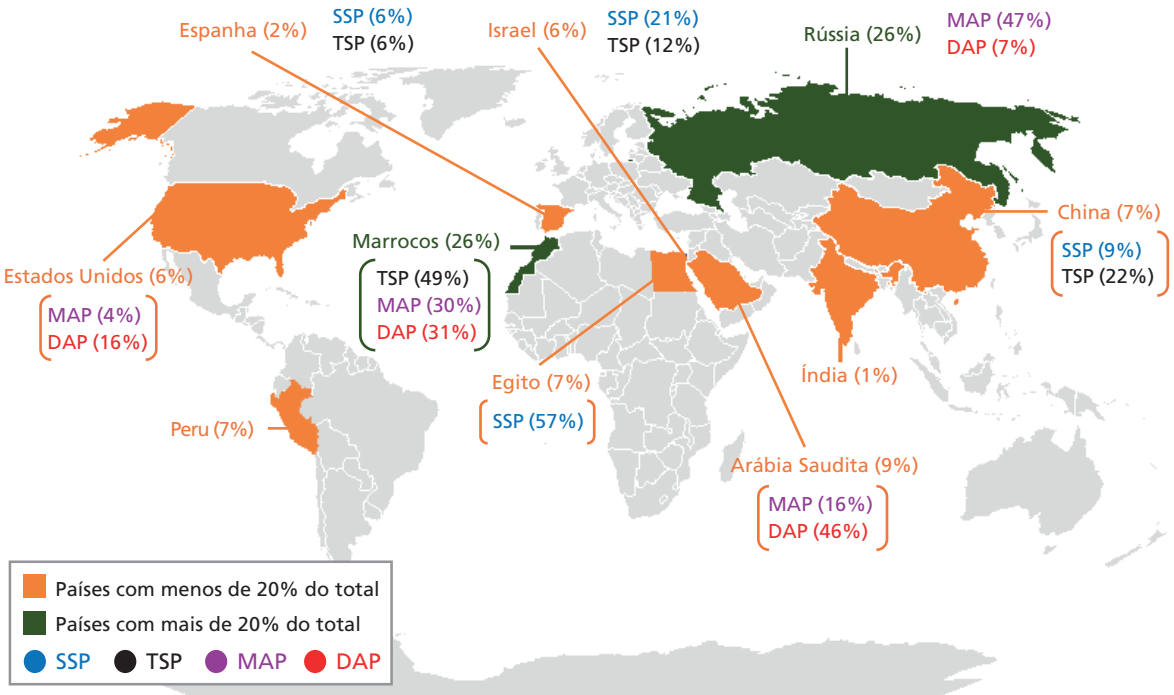
A disponibilidade de matéria-prima a preços acessíveis é fundamental para a produção de fertilizantes. Os fosfatados são gerados a partir da reação da rocha fosfática com outros insumos, como ácido sulfúrico, ácido fosfórico ou amônia, resultando no superfosfato simples (SSP), no superfosfato triplo (TSP), no fosfato monoamônico (MAP) ou no fosfato diamônico (DAP), entre outros. Com a utilização dos fosfatados em diversos cultivos agrícolas, a produção se desenvolve com maior vigor quando se adiciona com maiores concentrações de fosfato (Globalfert, 2024). De acordo com o gráfico 1, o Brasil importou 9 milhões de toneladas de fertilizantes fosfatados em 2023. O MAP representou 57,5%, o TSP 15,5%, o SSP 24,3% e o DAP 2,7%.

GRÁFICO 1
Percentual dos tipos de fertilizantes fosfatados importados pelo Brasil em 2023
(Em %)



Fonte: Globalfert (2024).
Elaboração dos autores.

FIGURA 1
Principais países fornecedores de fertilizantes fosfatados para o Brasil em 2023



Fonte: Globalfert (2024).
Elaboração dos autores.

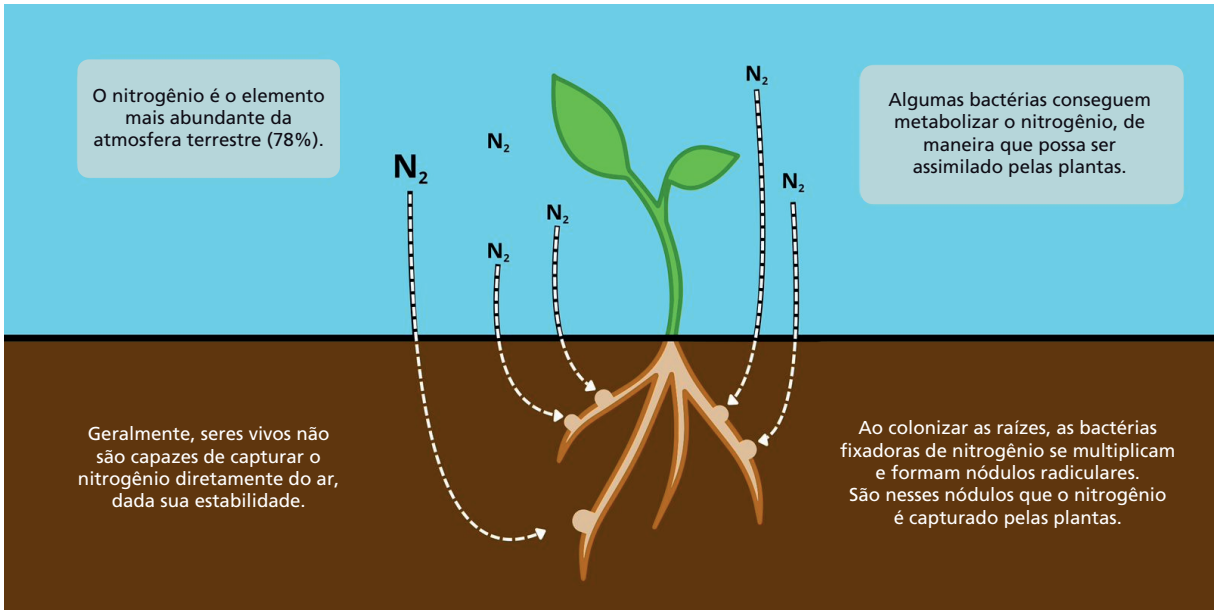
Conforme a figura 1, a maior quantia importada de fertilizantes fosfatados foi de MAP, com 5,2 milhões de toneladas (57,5%), sendo a Rússia (47%), o Marrocos (30%), a Arábia Saudita (16%) e os Estados Unidos (4%) os principais fornecedores. Em relação ao TSP, foram importadas 1,4 milhão de tonelada, ou 15,5% do total, principalmente do Marrocos (49%), da China (22%), de Israel (12%) e da Espanha (6%). Quanto às importações de SSP, as quais corresponderam 24,3% do total, suas principais origens foram Egito (57%), Israel (21%), China (9%) e Espanha (6%). Quanto ao DAP, importaram-se 2,7% do total, provenientes da Arábia Saudita (46%), do Marrocos (31%), dos Estados Unidos (16%) e da Rússia (7%) (Globalfert, 2024). Rússia (que representava 26%) e Marrocos (23%) concentraram praticamente metade das importações brasileiras de fosfatados (Globalfert, 2024). Especificamente sobre as importações brasileiras de fertilizantes fosfatados, várias das regiões exportadoras enfrentaram instabilidade.

2.2 Fixação biológica de nitrogênio

Nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são os macronutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas. Entretanto, no geral, os seres vivos não conseguem capturar o N diretamente da atmosfera por causa de sua estabilidade, apesar de sua abundância. Surgiram, então, a amônia e a ureia, que são produzidas por meio de processo químico que combinam N com hidrogênio. Apesar de custoso e complexo, este processo químico possibilitou a oferta de N em larga escala e diretamente para as plantas, aumentando a produtividade.

Não obstante, a inoculação de sementes com bactérias capazes de promover a fixação biológica de nitrogênio (FBN) começou a ser desenvolvida ainda em meados do século passado. A descoberta da associação entre bactérias *Bradyrhizobium* e raízes das plantas possibilitou a captura do nitrogênio do ar, de forma totalmente natural. Ao colonizarem as raízes das plantas, as bactérias formam nódulos, nos quais o processo de fixação do nitrogênio ocorre, naturalmente. A planta, em troca, fornece carboidratos para as bactérias e garante a elas um ambiente protegido (figura 2). Com o passar dos anos e com a expansão da soja na região Centro-Oeste, a FBN passou a ser utilizada em larga escala e tornou a soja brasileira mais competitiva no mercado internacional (Marin *et al*., 1999).

FIGURA 2
FBN



Elaboração dos autores.

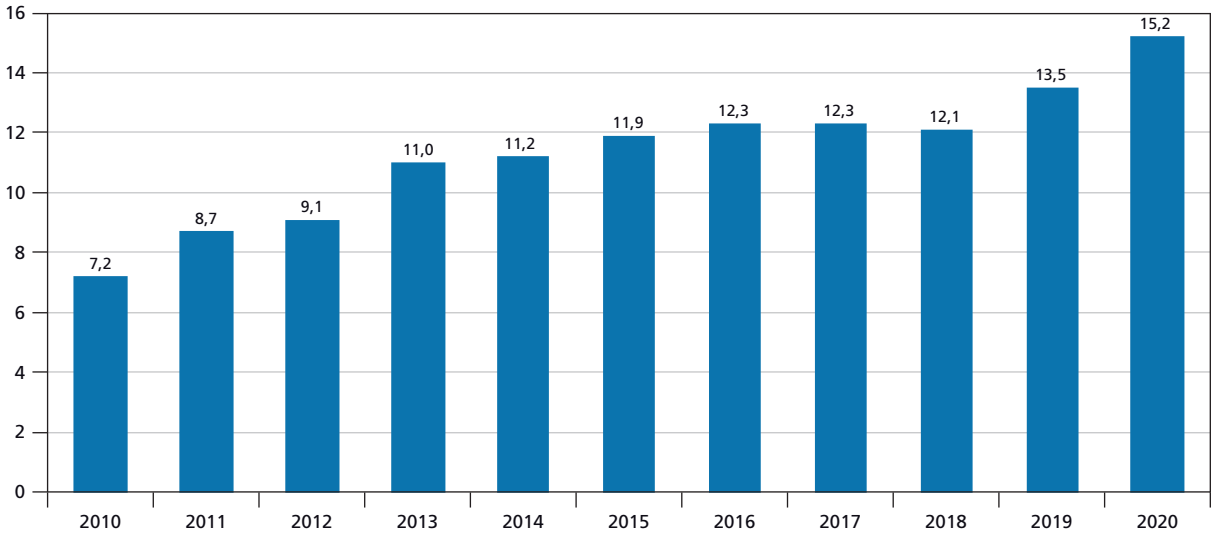
Além dos benefícios econômicos, a FBN apresenta benefícios ambientais, pois sua pegada de carbono é muito inferior em comparação à amônia e à ureia. Além disso, não há emissão de gases do efeito estufa como na fabricação de amônia e ureia.

Em estudo elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Hungria, Campo e Mendes (2007) estimaram economia de cerca de US$ 6,6 bilhões por safra para o Brasil graças à utilização da FBN. Para esse cálculo, os autores constataram a necessidade de 80 kg de nitrogênio para cada tonelada de grãos de soja. Consideraram, ainda, um rendimento médio de 3,0 t de soja/ha, o que implicaria na necessidade de 240 kg de nitrogênio/ha. Como os solos brasileiros fornecem uma contribuição natural baixa de nitrogênio (entre 10 kg e 30 kg), a necessidade de adição de nitrogênio cairia, no máximo, para 210 kg.

Contudo, devido às perdas elevadas que os fertilizantes nitrogenados apresentam no Brasil em decorrência de volatilização, lixiviação, escorrimento superficial e desnitrificação, raramente o teor que de fato fica disponível para absorção da planta excede a 50%. Assim, de maneira conservadora, seria preciso dobrar a quantidade de nitrogênio necessário para adubar a terra adequadamente: 420 kg de nitrogênio/ha – ou 930 kg de ureia, que contém 45% de nitrogênio em sua formulação – para se ter uma produtividade média de 3,0 t de grãos de soja.

A FBN pode suprir completamente a necessidade de nitrogênio da soja, sem que haja necessidade de se adicionar fertilizantes químicos. Conforme Hungria, Campo e Mendes (2007), a economia foi estimada ao se cruzar o preço do nitrogênio, ou sua parte relativa em um composto fertilizante, com a demanda necessária por hectare (420 kg de nitrogênio) e com a área plantada de soja no Brasil. As estimativas dessa economia potencial pela FBN entre os anos de 2010 e 2020 são apresentadas no gráfico 2.

GRÁFICO 2
Economia gerada na produção brasileira de soja em decorrência da FBN entre 2010 e 2020
(Em US$ bilhões)

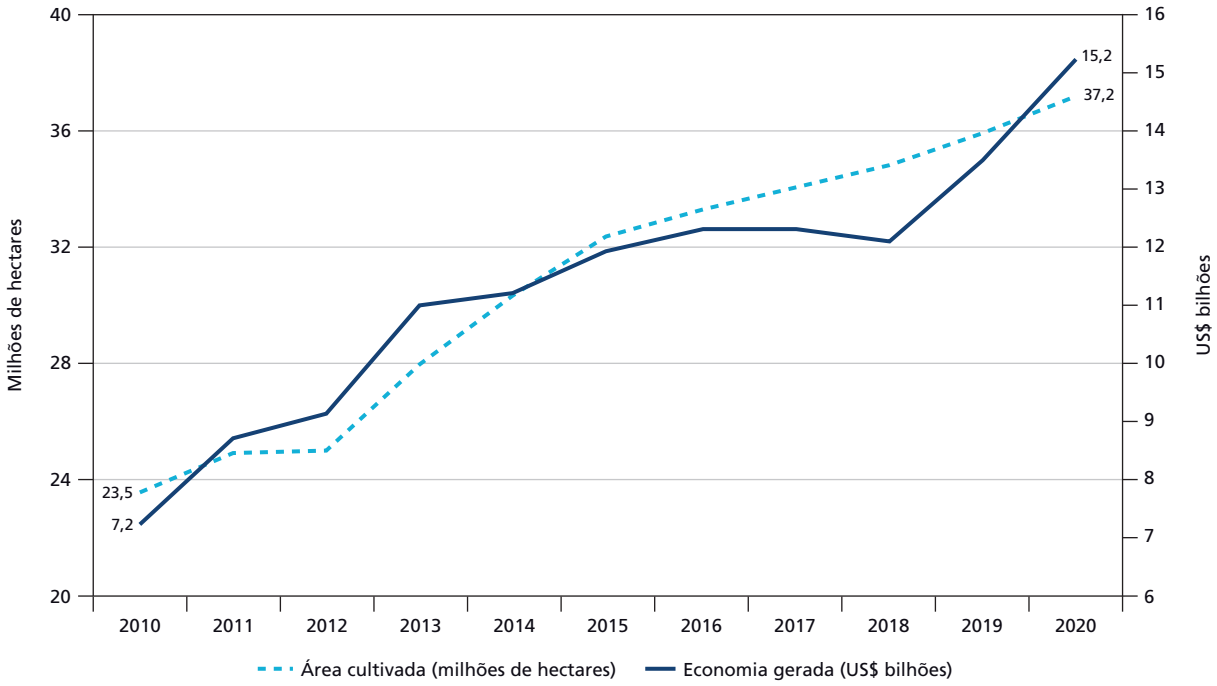


Fonte: Telles, Nogueira e Hungria (2023).
Obs.: US$ 1 = R$ 5 (valor de 30 de junho de 2021).

De toda forma, importa destacar a evolução dos ganhos com economia relativa à utilização da FBN com o passar do tempo. De acordo com o gráfico 3, a economia estimada, em 2010, foi de US$ 7,2 bilhões. Em 2020, esse valor mais que dobrou, saltando para US$ 15,2 bilhões. Tal evolução é explicada, em parte, pelo aumento da produtividade da soja ao longo do tempo. Destaca-se que a evolução da utilização da FBN e da produção de soja cresceram proporcionalmente e significativamente mais que a área plantada. Enquanto a média de crescimento anual da área plantada de soja foi de 9,7%, entre 1970 e 2020, sua produção cresceu 19,7% ao ano no mesmo período.

GRÁFICO 3

Crescimento da área cultivada de soja no Brasil e evolução da economia gerada em decorrência da FBN



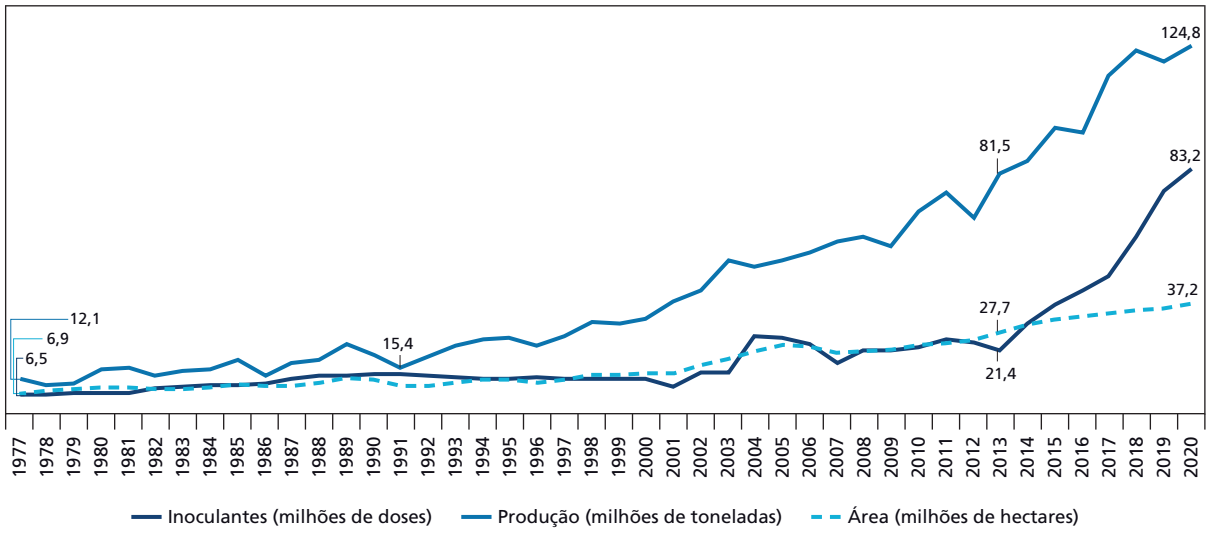
Fonte: Telles, Nogueira e Hungria (2023); e Conab (2024).
Elaboração dos autores.

No gráfico 4, visualiza-se a evolução da utilização da FBN (em milhões de doses aplicadas), da área plantada de soja (em milhões de hectares) e da produção de soja (em milhões de toneladas). Em 1977, a produção de soja foi de 12,1 milhões de toneladas, enquanto as doses de inoculantes estavam em 6,5 milhões. De 1991 a 2020, a produção cresceu de forma bastante expressiva de 15,4 milhões de toneladas a 124,8, em milhões de toneladas. Em relação aos inoculantes, o crescimento se mostra a partir de 2013, que registrou 21,4 milhões de doses. Em 2020, o uso de inoculantes aumentou cerca de quatro vezes mais, chegando a 83,2 milhões de doses. No período de 1977-2020, a área plantada saiu de 6,9 milhões de hectares para 37,2 milhões de hectares.

Todos esses parâmetros permitem que observações sejam feitas a respeito da FBN. Sem a economia gerada por ela, a produção nacional de soja não apresentaria a mesma competitividade.

GRÁFICO 4

A evolução da utilização da FBN, da área plantada e da produção de soja de 1977 a 2020



Fonte: Telles, Nogueira e Hungria (2023); e Conab (2024).

Sendo os solos brasileiros naturalmente pobres, a produção agrícola demanda muita complementação nutricional. A cada safra, a adubação química de nitrogênio tradicional, por meio do aumento do custo, reduz as margens do produtor rural, encarecendo a soja brasileira no mercado internacional. Assim, inovações, como os inoculantes que potencializam a FBN, diminuem o custo dos insumos, melhorando a nutrição das plantas. Desse modo, a produção de soja brasileira não teria a mesma viabilidade econômica sem a FBN (Hungria, Campo e Mendes, 2001).

Outro ponto importante é a adoção da FBN ao longo do tempo. Houve crescimento lento e gradual do número de doses aplicadas de inoculantes contendo as bactérias fixadoras de nitrogênio nas décadas de 1970, 1980 e 1990. Entretanto, foi a partir da década de 2000 que o crescimento do número de doses aplicadas cresceu mais rapidamente. Nesse período, os primeiros inoculantes líquidos começaram a ser comercializados no país, o que facilitou a difusão dos inoculantes com bactérias fixadoras de nitrogênio pelos agricultores.

A partir de 2013, observou-se aumento ainda mais vertiginoso da aplicação de doses de inoculantes. Nessa época, concebeu-se a técnica de coinoculação das bactérias *Bradyrhizobium spp.* com *A. brasiliense* (Santos, Nogueira e Hungria, 2019; 2021). Aliás, a coinoculação dessas bactérias duplica os ganhos de produtividade se comparada à inoculação singular com *Bradyrhizobium spp.* (Hungria, Nogueira e Araujo, 2013).

Não por acaso, observou-se o aumento do ritmo de crescimento da produção de soja nesses períodos mencionados. Economiza-se com a não aplicação de fertilizantes e, ao mesmo tempo, aumenta-se o ganho com o incremento da produtividade.

2.3 SBF

De forma análoga à FBN, pesquisas buscaram aprimorar a absorção do fosfato existente no solo pelas plantas. O fosfato é um macronutriente essencial para o desenvolvimento e o crescimento dos vegetais. Segundo Mendes e Reis Junior (2003), as condições edafoclimáticas observadas no Brasil diminuem a disponibilidade desse macronutriente. O intemperismo dos solos tropicais – em especial os do Cerrado –, que contêm argilas e óxidos capazes de fixar o fosfato à terra, diminui o nível real de fosfato à disposição das plantas.

Essa "disputa" pelo fosfato entre as plantas e o solo (argilas e óxidos) é conhecida como "custo solo", que gera menor aproveitamento do fosfato disponível e, consequentemente, resulta na necessidade de aplicação de maiores quantidades de fertilizantes, elevando o gasto econômico do plantio. Estima-se que cerca de 70% do fosfato aplicado por meio de fertilizantes, tanto minerais, quanto orgânicos, fique acumulado no solo em forma pouco acessível aos vegetais (Pavinato *et al*., 2020). Isso significa uma perda relevante de aproveitamento do fertilizante fosfatado nas extensas áreas agricultáveis do país.

Nesse sentido, pesquisas são conduzidas no Brasil há cerca de vinte anos, com resultados promissores relacionados à SBF. Segundo Paiva *et al*. (2009), nesse bioprocesso, microrganismos, fungos e bactérias transformam fosfatos insolúveis, fixados na terra, em formas solúveis, de maneira a aumentar o nível de disponibilidade desse nutriente para as plantas.

Os microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs) são capazes de solubilizar ou mineralizar o nutriente fosfato. Os principais gêneros são os *Pseudomonas*, *Bacillus* (bactérias) e *Aspergillus* (fungo), que agem por meio de produção de ácidos, de secreção de enzimas ou por liberação de compostos quelantes.

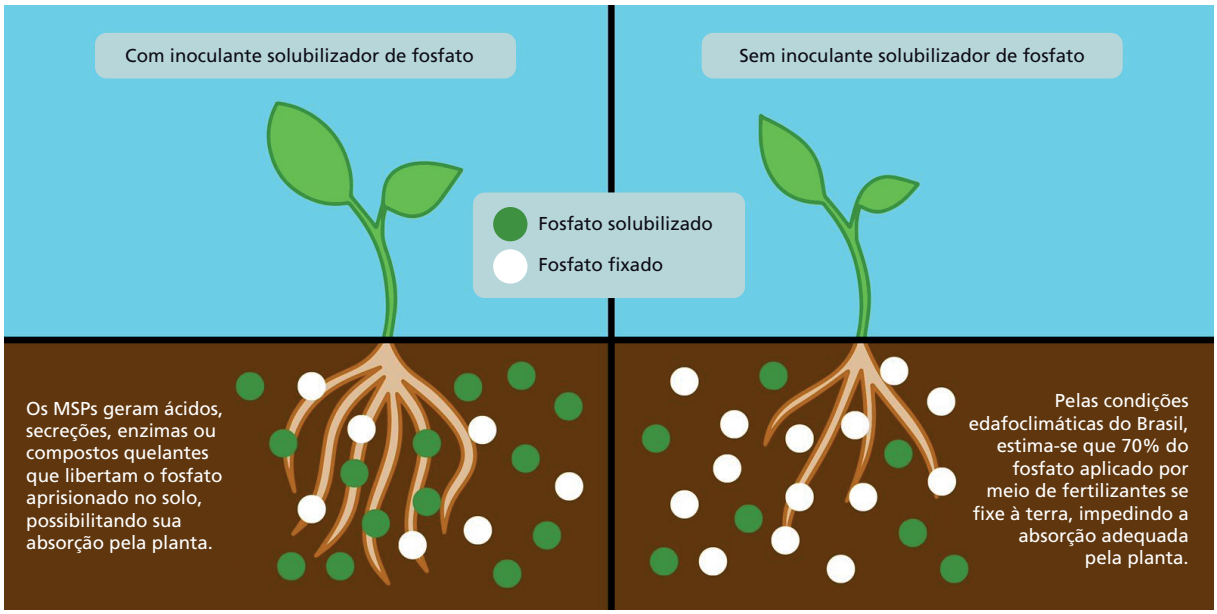
A solubilização por meio dos microrganismos se dá, de forma mais comum, ao produzirem ácidos orgânicos e inorgânicos, pela liberação do fosfato de compostos óxidos de ferro, de alumínio e de cálcio, que estejam no solo ou em rochas fosfáticas. Esses ácidos complexam o fosfato e o tornam solúvel, possibilitando que seja absorvido

pelas raízes das plantas. Entretanto, além dos ácidos, a ação dos MSPs libera compostos quelantes (sideróforos), que fazem a ligação de cátions, como ferro e cálcio, o que também ajuda no processo.

Já a mineralização do fosfato orgânico pelos MSPs ocorre por meio da liberação de enzimas, como a fosfatase, que envolve a matéria orgânica no solo. Ao degradar compostos orgânicos que contenham fósforo, o nutriente é liberado da fixação do solo (Bini e Lopez, 2016).

De uma forma ou de outra, esses bioprocessos diminuem o pH do solo, o que ajuda a liberar o fosfato dos minerais, tornando-o solúvel (figura 3). É importante ter em mente que a forma de atuação dos MSPs se dá em associação ao fosfato já disponível de alguma forma no solo, uma vez que os micro-organismos não têm capacidade de produzir fosfato. Se, por um lado, as bactérias da FBN conseguem "sequestrar" o nitrogênio em abundância na atmosfera e ofertá-lo para a planta; por outro lado, os MSPs são capazes de facilitar a absorção, pela planta, do fosfato disponível ao dissociá-lo do solo.

FIGURA 3
SBF



Elaboração dos autores.

Além da liberação das substâncias mineralizadoras e solubilizadoras de fosfato (enzimas e ácidos orgânicos), percebe-se o aumento das raízes finas das plantas e

da produção de biofilme em função da ação dos MSPs. Ao conseguir absorver mais fosfato nos estágios iniciais de crescimento, a planta apresenta maior vigor, de maneira que seu arranque inicial se mostra superior, resultando em maior produtividade (Marin *et al*., 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 Revisão da literatura

Quanto à FBN, na literatura existem diversos estudos que trataram do tema: Döbbereiner *et al*. (1978; 1980); Hungria, Nogueira e Araujo (2013); Santos, Nogueira e Hungria (2019; 2021); e Telles, Nogueira e Hungria (2023). Já sobre a SBF, os principais textos de apoio deste trabalho foram: Corrêa *et al*. (2004); Paiva *et al*. (2009); Patil *et al*. (2012); Lavakush *et al*. (2014); Marin *et al*. (2015); Owen *et al*. (2015); Bini e Lopez (2016); Granada *et al*. (2018); Pavinato *et al*. (2020); e Wang *et al.* (2022).

Foram utilizados também circulares e boletins técnicos publicados pela Embrapa (Marin *et al*., 1999; Hungria, Campo e Mendes, 2001; 2007; Mendes e Reis Junior, 2003; Souza *et al*., 2016; Paiva *et al*., 2020a; Paiva *et al*., 2020b; Vasconcelos, Figueiredo e Oliveira, 2021; Paiva *et al*., 2021; Cançado *et al*., 2021; Paiva *et al*., 2021) acerca da FBN e da SBF para as pesquisas qualitativa e quantitativa. Para estimar os ganhos com aumento de produção, consideraram-se dados extraídos de seis estudos de campo sobre cultivos de soja, os quais utilizaram biossolubilizadores de fosfato para promover o desenvolvimento das plantas.

O objetivo desses estudos de campo foi avaliar a eficiência e praticabilidade agronômica de diferentes solubilizadores de fosfato à base de microrganismos, a partir da combinação de três variáveis: produtos inoculantes de SBF, métodos de aplicação e doses.

No que se referem aos produtos, cada estudo utilizou uma cesta específica de solubilizadores de fosfato para experimentação. Em comum, todos utilizaram ao menos o BiomaPhos, que é um inoculante à base de bactérias solubilizadoras de fosfato (*Bacillus subtilis* e *B. megaterium*), lançado pela Embrapa em 2019; e o Meli-X Turbo, que é à base de outras bactérias (*Bacillus velezensis*) e que foi lançado pela empresa Vittia, em 2022.

Os métodos de aplicação variaram entre: tratamento de sementes; sulco em que a semente seria plantada; plante-aplique (aplicação após a plantação); ou via v3/v4 (aplicação nos estágios três e quatro do crescimento da planta). Em relação à dose, houve variação entre 0,1 e 5 litros ou quilogramas/ha, a depender do produto utilizado.

Com isso, foi possível atestar, ou não, o aumento da produtividade no cultivo de soja e comparar as diferentes combinações de produtos, de métodos de aplicação e de dosagens, entre os respectivos grupos de controle.

Inicialmente, foram registrados dados referentes às localizações geográficas, às condições climáticas durante os ensaios, às datas das semeaduras e às variedades de soja. De maneira geral, foi possível dividir os parâmetros de comparação dos estudos em três grandes grupos, conforme a seguir.

1) Características químicas: quantidade de N, P, K, cálcio, magnésio, enxofre, boro, cobre, ferro, manganês, zinco e sódio – contidas em folhas; grãos; e solo.

2) Características físicas das plantas: número de plantas por metro quadrado; altura e peso; média de massa fresca, de massa seca da raiz e de parte aérea das plantas; comprimento da raiz, número de nós, número de hastes, número de vagens; e umidade, peso úmido de grãos e peso de mil grãos.

3) Produtividade: medida em sacas ou em kg/ha.

As estimativas dos potenciais ganhos em decorrência da ação da SBF usaram a produtividade como parâmetro, que foi gerado em todos os ensaios mencionados.

3.2 Método de análise

Estimar o impacto da SBF é um desafio, já que depende de diversas variáveis, como a eficiência dos microrganismos, as condições específicas do solo, os tipos de cultura e a escala da aplicação da SBF. Com base em estudos de casos, em dados disponíveis e na literatura, a mensuração do impacto deve contemplar: i) a diminuição da utilização de fertilizantes químicos (redução do custo de produção); ii) a utilização do estoque de fosfato no solo; iii) o aumento da produtividade na soja (incremento da receita); e iv) a diminuição da emissão de gases efeito estufa, mensurados em gás carbônico equivalente (CO_{2eq}), dada a substituição parcial da fertilização química por bioinsumo.

No que tange ao primeiro aspecto de avaliação, desde os anos 2000, estudos estimam relativa prescindibilidade de adubação de fosfato ao se utilizar a SBF. No caso

do milho, concluiu-se que seria possível diminuir o uso de fertilizantes fosfatados em 50% com a inoculação de sementes com fungos solubilizadores de fosfato – *Penicillium bilaji e Penicillium spp* (Patil *et al*. 2012). Nesse sentido, Wang *et al*. (2022) notaram aumento de fosfato disponível em 22%, conjugado com a diminuição do fosfato estabilizado em mais de 46%, por meio do uso da SBF para a cultura do milho.

O mesmo percentual de 50% de diminuição da adubação de fosfato também seria possível para o arroz (Lavakush *et al*., 2014). Granada *et al*. (2018), por sua vez, citaram diversos estudos para concluir que há possibilidade de redução média de 33% no nível de adubação de fosfato, caso haja inoculação de sementes de diversas culturas com MSP.

Considerando, portanto, o nível de aumento de fosfato disponível no solo que pode ser oferecido com a possibilidade de diminuição proporcional de adubação entre 30% e 50%, a SBF pode gerar uma economia expressiva se aplicada em grande escala, com variações relativas ao tipo de cultura e da disponibilidade de fosfato no solo.

Nesse sentido, o cálculo de eventual economia sobre a menor utilização de fertilizantes químicos fosfatados passa por considerações relativas à adubação de correção e de manutenção. No primeiro, a adubação fosfatada corretiva (fosfatagem) serve para aumentar a disponibilidade de fosfato no solo a níveis aceitáveis para um bom cultivo. Trata-se de enriquecer um solo pobre com fosfato (Souza *et al*., 2016).

Nesse caso, a dose de fosfato a ser aplicada é encontrada por meio da diferença entre o que se tem no solo e o que se deseja ter, multiplicada por um fator chamado de capacidade tampão de fósforo no solo (CTP), que nada mais é do que a dose de fosfato (P_2O_5) necessária para se elevar o teor de fósforo em 1 mg dm^{-3} (Souza *et al*., 2016). Ainda que se entenda que o impacto da SBF pode ser maior na adubação corretiva, este estudo não a considerou em suas estimativas, pois estimar o nível de estoque de fosfato médio para terras em todo o país para o plantio de soja exigiria uma extrapolação significativa.

Já a adubação fosfatada de manutenção é utilizada quando há disponibilidade adequada de fosfato no solo para o cultivo (Souza *et al*., 2016). Assim, a dose de manutenção tende a ser menor, sendo necessário repor apenas o suficiente para manter o potencial produtivo da área. Trata-se de recompor o fosfato que foi extraído do solo pela planta para se desenvolver.

A recomendação da quantidade de fosfato varia de acordo com a classe de disponibilidade do nutriente no solo e a produtividade almejada. Para tanto, a recomendação

considera que se utilize a técnica de plantio direto bem manejado e sem limitações de ordem química, física ou biológica. Ainda, tomou-se como referência que cada tonelada de grãos de soja exporta 15 kg de P_2O_5. Dessa maneira, considerando um solo com nível adequado de fosfato para o plantio de soja, é necessária uma dose de reposição de 45 kg de P_2O_5/ha, caso se deseje produzir 3 t de soja/ha (Souza *et al*., 2016).[1]

TABELA 1
Recomendação de adubação de manutenção de acordo com a classe de disponibilidade de fósforo no solo e a produtividade almejada para a soja no Cerrado

Produtividade almejada em cultura de soja (t/ha)	Interpretação do teor de P da análise de solo	
	Adequado	Alto
	Dose de P a aplicar no solo (kg de fosfato/ha)	
3	45	30
4	60	40
5	75	50
Taxa do desfrute do P aplicado	100%	150%

Fonte: Souza *et al*. (2016).

Conforme Conab (2024), a produtividade média das plantações de soja ultrapassou as 3,5 t/ha na safra 2017-2018 e tem ficado em torno desse mesmo patamar desde então. Considerando uma produtividade de 4,0 t/ha, este estudo utilizou como parâmetro a dose de manutenção recomendada de 60kg de P_2O_5/ha.

Granada *et al*. (2018), mesmo considerando que a SBF incrementa a absorção do fosfato pela planta de maneira a diminuir sua necessidade em 33% na média, alertam que há certa carência de pesquisas que quantifiquem a redução de fosfato em função da ação da SBF.

Dessa forma, este estudo utilizou os percentuais de 30% a 50% de diminuição da necessidade da fertilização, se aplicada em conjunto com a SBF, como *benchmark*[2]. Assim, no caso da economia de 30%, a dose de manutenção de fosfato seria de 42 kg de P_2O_5/ha, em vez de 60 kg, o que levaria a uma economia de 18 kg de P_2O_5/ha.

1. A recomendação em consideração foi elaborada para o cultivo de soja em região de Cerrado e adotada, para as estimativas deste estudo, para o restante do país.

2. Ao longo deste trabalho, esse o intervalo de confiança foi chamado, nos cálculos, como limite inferior, quando se considerou a economia de 30%, e superior, quando se observou a economia de 50%.

Já no caso da economia estimada em 50%, a dose de manutenção de fosfato seria de 30 kg, o que levaria a uma economia de 30 kg de P_2O_5/ha.

Para se estimar a economia potencial, portanto, é preciso considerar, além da quantidade a economizar (um valor que varie de 18 kg a 30kg de P_2O_5/ha), a área plantada de soja e o preço da tonelada de P_2O_5. De acordo com Conab (2024), a área plantada de soja no Brasil foi de 46,1 milhões de hectares na safra 2023-2024.

Para se chegar ao valor do P_2O_5, utilizaram-se os preços dos principais fertilizantes fosfatados adotados na agricultura brasileira: SSP, TSP, MAP e DAP[3]. Cada um deles possui composição própria, com diferentes concentrações de P_2O_5[4]. Portanto, não se deve simplesmente considerar o preço proporcional de 18 kg ou 30 kg de um desses produtos, mas sim o preço relativo a uma quantidade do produto que contenha 18 kg ou 30 kg de fosfato.

Dessa forma, para se se chegar ao valor correspondente à "economia potencial" a ser gerada com a diminuição do uso de fertilizantes, deve-se multiplicar o produto da área cultivada de soja com o preço da tonelada do fertilizante escolhido como parâmetro, assim como pela quantidade de fosfato a ser economizada (18 kg ou 30 kg). Por fim, dividir esse produto pela quantidade de fosfato presente em uma tonelada de fertilizante.

Assim, a equação (1) apresenta o cálculo da economia potencial monetizada.

$$EP_{it} = (p_{it}.A_t).(Q^*/Q_{it}) \quad (1)$$

Em que:

- P_{it} é a economia potencial monetizada no tempo t calculada com base no fertilizante i (em R$);
- A_t é a área cultivada de soja (em hectares) no tempo t;
- p_{it} é o preço da tonelada do fertilizante i no tempo t (em R$);

3. Para fins das simulações, os preços do SSP, STP e MAP foram fornecidos pela Conab, relativos a julho de 2024. Os preços do SSP e do MAP foram referentes ao estado do Mato Grosso, enquanto o preço do STP foi referente ao estado do Paraná. Já o preço do DAP foi fornecido pela Argus Brasil Grãos e Fertilizantes, na edição 24-37, de setembro de 2024, considerando o preço da importação, custo e frete (CFR), a granel.

4. Os teores de P_2O_5 relativos aos fertilizantes destacados neste trabalho foram retiradas do anexo I da Instrução Normativa nº 39/2018 do Mapa (Brasil, 2018).

- Q^* é a quantidade de fosfato a ser economizada pela tecnologia em questão: 18 kg a 30 (kg/ha); e
- Q_{it} é a quantidade de fosfato presente em uma tonelada do fertilizante i no tempo t (em kg), que é obtida a partir do teor de fosfato contido no fertilizante i utilizado como parâmetro. O termo Q^*/Q_{it} descreve a participação do efeito poupa-terra da tecnologia (SBF).

Para se estimar o impacto tecnológico máximo no aproveitamento do estoque de fosfato no solo, basta considerar Q^* igual a 60 kg nos cálculos, uma vez que toda a necessidade de fosfato para a manutenção seria obtida com o aproveitamento do fosfato já depositado no solo (Souza *et al.*, 2016).

No que tange à estimativa do impacto da SBF sobre o aumento da produtividade da soja, consideraram-se dados coletados a partir dos estudos de campo. Importante registrar que os estudos não são completamente homogêneos, havendo diferenças quanto aos produtos que contêm os MSPs, os métodos de aplicação e as dosagens consideradas, além das combinações entre esses três fatores.

Contudo, em cada estudo, é possível verificar a comparação entre os grupos de tratados e de controles, que não receberam a intervenção, particularmente em relação ao cálculo de produtividade.[5] Em cada estudo, a variável produtividade foi calculada com base na quantidade de soja (em kg), que foi colhida com a utilização de um biossolubilizador de fosfato. A proporção foi feita considerando um hectare de terra.

Finalmente, a estimativa do impacto econômico, a partir da descarbonização potencial com o uso em massa da SBF na sojicultura brasileira, levou em conta a emissão de gás carbônico equivalente (CO_{2eq}) para a produção de fosfato, considerando três setores: i) a mineração do fosfato, a partir de dados publicados em Ibram (2024); ii) a produção industrial do fertilizante fosfatado, conforme dados extraídos do Manual da Calculadora de Emissões de Gases do Efeito Estufa para Resíduos (Giegrich, 2021); e iii) o frete internacional, segundo dados publicados por UK (2023).

5. Embora este trabalho utilize apenas os parâmetros de produtividade encontrados nos estudos em análise, os demais parâmetros observados estão disponibilizados em Caligaris (2024). É importante ressaltar ainda que não houve diferença na dose de adubação entre os grupos tratado e controle. Por esse motivo, não haveria redução de custos com adubação, de forma que não seria adequado somar o impacto de redução de custo (primeira estimativa) com o do aumento de produtividade (segunda estimativa).

A soma das emissões geradas nesses três setores resulta na estimativa de CO_{2eq} emitido pela agricultura brasileira ao utilizar fertilizantes fosfatados para a adubação de manutenção da soja. Para se chegar ao impacto econômico, além da soma do CO_{2eq} emitido, também foi considerada a quantidade economizada de fosfato (limites inferior e superior); a área plantada; e o preço praticado do crédito de carbono.

Portanto, para se calcular a monetização correspondente à potencial descarbonização gerada pela adoção da SBF, tem-se a equação (2).

$$DP_t = A_t . \left[\left(\sum_{j=1}^{3} E_j\right) . Q^*\right] . pc_t \quad (2)$$

Em que:

- DP_t é a descarbonização potencial monetizada no tempo t com base na tecnologia dada (em R$);
- A_t é a área cultivada de soja (em hectares) no tempo t;
- o termo entre parênteses, $\sum_{j=1}^{3} E_j$, é o somatório das emissões nos três setores (1 igual ao setor mineral; 2 setor industrial; e 3 setor de transporte), sendo que $E_3 = E_t . d$, no qual E_t é a emissão gerada em 1 km e d é a distância (em km) do mercado fornecedor do fertilizante i até o mercado nacional (em $kgCO_{2eq}$/kg);
- Q^* é a quantidade de fosfato a ser economizada por hectare pela tecnologia na adubação de manutenção (em kg/ha); e
- pc_t é o preço do crédito de carbono (em R$/$kgCO_{2eq}$).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tabela 2 apresenta a avaliação resultante da redução da utilização de fertilizantes químicos, conforme o fertilizante fosfatado considerado e seu respectivo preço. Em julho de 2024, a tonelada do SSP, por exemplo, custava cerca de R$ 2.276, sendo que seu teor de P_2O_5 é de 18%. Assim, a tonelada do SSP contém 180 kg de fosfato. Proporcionalmente, para se obter 18 kg ou 30 kg de fosfato (limites inferior e superior de economia) a partir do SSP, seriam necessários, respectivamente, 100 kg ou 166 kg desse fertilizante.

Dessa forma, o produto da área cultivada com o preço da tonelada do SSP foi multiplicado pela quantidade de fosfato a ser economizada por hectare e dividido pela quantidade de fosfato presente em uma tonelada do fertilizante utilizado como parâmetro. Chega-se, então, aos respectivos valores de economia potencial, que, para o SSP, seria de R$ 10,5 a R$ 17,5 bilhões, a preços de julho de 2024.

Quando as estimativas consideram as variáveis de acordo com o TSP (41% de teor e R$ 2.976 a tonelada), a economia potencial seria entre R$ 6,0 bilhões e R$ 10,0 bilhões. Para o MAP (48% de teor e R$ 4.343 a tonelada), a economia potencial variou entre R$ 7,5 bilhões e R$ 12,5 bilhões. Em relação ao DAP (45% de teor e R$ 3.588 a tonelada), a economia potencial em associar sua utilização com a SBF foi estimada entre R$ 6,6 bilhões e R$ 10,9 bilhões. Cumpre esclarecer que os distintos cenários são alternativos, e não cumulativos.

TABELA 2

Economia potencial com a utilização de SBF, conforme o tipo de fertilizante (SSP, TSP, MAP e DAP)

Variáveis	Unidades	Itens[1]	Limite inferior (economia de 30%)				Limite superior (economia de 50%)			
			SSP	TSP	MAP	DAP	SSP	TSP	MAP	DAP
Teor de fosfato	%	A	18	41	48	45	18	41	48	45
Quantidade de fosfato em 1 t do fertilizante	kg	B (Q_{it})	180	410	480	450	180	410	480	450
Economia de fosfato para manter a produtividade em 4 t de soja/ha	kg(ha)$^{-1}$	C (Q^*)	18	18	18	18	30	30	30	30
Participação de economia do fosfato em 1 t do fertilizante	(ha)$^{-1}$	D = C/B (Q^*/Q_{it})	10,0	4,4	3,8	4,0	16,7	7,3	6,3	6,7
Preço de 1 t do fertilizante	1 mil R$	E (p_{it})	2,3	3,0	4,3	3,6	2,3	3,0	4,3	3,6

(Continua)

(Continuação)

Variáveis	Unidades	Itens[1]	Limite inferior (economia de 30%)				Limite superior (economia de 50%)			
			SSP	TSP	MAP	DAP	SSP	TSP	MAP	DAP
Área cultivada de soja	Milhões de ha	F (A_t)	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1
Economia potencial	Bilhões R$	EP = D.E.F	10,5	6,0	7,5	6,6	17,5	10,0	12,5	10,9

Fonte: Souza *et al*. (2016), Brasil (2018); e Conab (2024).
Elaboração dos autores.
Nota: [1] Q_{it} é a quantidade de fosfato presente em uma tonelada do fertilizante i no tempo t (em kg); Q^* é a quantidade de fosfato a ser economizada pela tecnologia em questão; p_{it} é o preço da tonelada do fertilizante i no tempo t (em R$); e A_t é a área cultivada de soja (em hectares) no tempo t.

Com relação à utilização do estoque de fosfato, estima-se que os solos brasileiros tenham acumulado, desde a década de 1960, uma quantidade equivalente a US$ 22 bilhões. Para os solos dedicados ao cultivo de soja, estima-se que possuam até 314 kg de fosfato/ha (Pavinato *et al*., 2020). Com a utilização da SBF, seria possível, em tese, recorrer por até cinco safras a esse fosfato acumulado, em vez de providenciar a adubação de manutenção por meio de fertilização. Mantido o padrão de produção desejável de 4,0 t de soja/ha, a tabela 3 apresenta a economia potencial máxima com a SBF sem a necessidade de adubação de manutenção. A economia potencial máxima varia de R$ 20,1 bilhões a R$ 35,0 bilhões, dependendo do tipo de fertilizante utilizado, por safra.

TABELA 3
Economia potencial máxima pela utilização do estoque de fosfato no solo (60 kg) com a utilização da SFB, conforme tipo de fertilizante (SSP, TSP, MAP e DAP)

Variáveis	Unidades	Itens[1]	SSP	TSP	MAP	DAP
Teor de fosfato	%	A	18	41	48	45
Quantidade de fosfato em 1 t do fertilizante	Kg	B (Q_{it})	180	410	480	450
Economia de fosfato para manter a produtividade em 4 t/ha	Kg/ha	C (Q^*)	60	60	60	60
Percentual a ser economizado do fosfato presente em 1 t do fertilizante	%/ha	D = C/B (Q^*/Q_{it})	33,3	14,6	12,5	13,3

(Continua)

(Continuação)

Variáveis	Unidades	Itens[1]	SSP	TSP	MAP	DAP
Preço de 1 t do fertilizante	Mil R$	$\mathrm{E}(p_{it})$	2,3	3,0	4,3	3,6
Área cultivada de soja	Milhões de ha	$\mathrm{F}(A_t)$	46,1	46,1	46,1	46,1
Economia potencial máxima	Bilhões R$	$\mathrm{EP} = \mathrm{D.E.F}$	35,0	20,1	25,0	21,9

Fonte: Souza *et al*. (2016), Brasil (2018), Pavinato *et al*. (2020); e Conab (2024).
Elaboração dos autores.
Nota: [1] Q_{it} é a quantidade de fosfato presente em uma tonelada do fertilizante i no tempo t (em kg); Q^* é a quantidade de fosfato a ser economizada pela tecnologia em questão; p_{it} é o preço da tonelada do fertilizante i no tempo t (em R$); e A_t é a área cultivada de soja (em hectares) no tempo t.

Em relação às estimativas acerca do aumento da produtividade da soja em decorrência da SBF, foi possível observar os resultados obtidos nos seis estudos de campo[6] em comparação aos respectivos grupos de controle. A tabela 4 apresenta o comparativo do controle não tratado com inoculantes e nos seis estudos com o uso dos inoculantes A e B.[7] Observa-se que o ganho médio com a utilização do produto A foi de 6,9%, enquanto o ganho médio com o produto B foi de 9,5%. Contudo, o foco não seria o comparativo entre os produtos. Além disso, o produtor rural pode escolher entre diversos produtos, métodos e doses. Assim, calculou-se o ganho médio mínimo (5,9%) e o ganho médio máximo (10,5%), considerando os melhores e os piores resultados entre os produtos em cada estudo de campo.

Naturalmente, o ganho médio máximo encontrado, por selecionar o produto que apresentou o maior aumento de produtividade em determinada condição, foi superior ao registrado pelos ganhos de produtividade individuais dos produtos. Isso foi verificado, por exemplo, no estudo de validação do produto A, fruto da pesquisa pública (Cançado, 2021). No caso do estudo da Embrapa, constataram-se ganhos médios de produtividade de 7,8% na safra 2020-2021, com destaque para "o ganho médio econômico com a inoculação [que] foi quase dez vezes superior ao custo da aplicação do produto" (Paiva, 2021, p.15).

6. Estudo 1: Itapetininga/SP; estudo 2: Unaí/MG; estudo 3: São João da Paraúna/GO; estudo 4: Rio Verde/GO; estudo 5: Luís Eduardo Magalhães/BA; e estudo 6: Canarana/MT.

7. O produto A é o BiomaPhos; e o produto B é o Meli-X Turbo.

TABELA 4
Ganho de produtividade aferido em estudos com a utilização da SBF

Estudo	Produção do controle (kg/ha)	Produção com A (kg/ha)	Produção com B (kg/ha)	Ganho com A[1] (%)	Ganho com B[1] (%)
1	4.329	4.594	4.806	6,1	11,0
2	3.401	3.479	3.494	2,3	2,7
3	4.746	5.340	5.250	12,5	10,6
4	4.338	4.686	4.524	8,0	4,3
5	2.716	2.902	3.163	6,8	16,4
6	4.683	4.937	5.254	5,4	12,2
Ganho médio				6,9	9,5

Ganho médio mínimo		Ganho médio máximo		Ganho pesquisa Embrapa
5,9%	→	10,5%	→	7,8%

Fonte: Grupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano (Gapes), 2023.
Elaboração dos autores.
Nota: [1] Valores azuis são máximos; valores vermelhos são mínimos.

Para a safra 2023-2024, a produção de soja foi de 147,7 milhões de toneladas, em uma área plantada de 46,1 milhões de hectares, o que resultou em uma produtividade média de cerca de 3,2 t/ha (Conab, 2024). Com a utilização em larga escala da SBF, haveria um incremento médio máximo de 10,5% da produção de soja. Tudo o mais mantido constante, o ganho de produtividade médio máximo resultaria em uma produção adicional de 15,5 milhões de toneladas de soja. Considerando o preço da tonelada da soja a R$ 2.016,[8] esse ganho de produtividade significaria um incremento na receita da produção de soja de cerca de R$ 31,3 bilhões por safra.

A tabela 5 apresenta os cálculos de incremento na receita da produção de soja a partir das médias de ganhos de produtividade mensurados. Observa-se, portanto, uma faixa de aumento da receita de produção de soja entre R$ 17,7 bilhões a R$ 31,3 bilhões por safra.

8. Cotação de R$ 120,98 a saca de soja (60 kg), em julho de 2024, no estado do Mato Groso. Disponível em: https://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/.

TABELA 5
Incremento na receita da produção de soja a partir das médias de ganhos de produtividade com SBF

Tipo de ganho médio	Incremento (%)	Ganho de produtividade (milhões de toneladas)	Aumento da receita (R$ bilhões)
Máximo	10,5	15,5	31,3
Produto B	8,9	13,2	26,6
Pesquisa Embrapa	7,8	11,5	23,2
Produto A	6,9	10,1	20,5
Mínimo	5,9	8,8	17,7

Fonte: Gapes, 2023, Paiva *et al*. (2021); e Conab (2024.
Elaboração dos autores.
Obs.: Considerou-se estimativa de produção de 166,1 milhões de toneladas de soja para a safra 2024-2025 e o preço da tonelada do cultivo de R$ 2.016,00.

Com relação à descarbonização advinda da adoção da SBF, o cálculo da estimativa refletiu três momentos distintos: mineração, industrialização e transporte. Na fase da mineração, considerou-se a emissão de CO_{2eq} nas etapas de combustão estacionária, combustão móvel, fugitivas, mudança do uso do solo, processos industriais, resíduos sólidos e efluentes líquidos, bem como energia elétrica. Nesse sentido, em 2022, a mineração de fosfato brasileira emitiu 323 mil toneladas de CO_{2eq}, o que resultou no indicador de 0,0085 kg de CO_{2eq} emitido por kg de fosfato minerado (Ibram, 2024). Quanto à produção industrial, o fertilizante fosfatado gera 1,56 kg de CO_{2eq} para cada kg de fosfato produzido (Giegrich, 2021).

No que diz respeito à emissão gerada no transporte, para fins de estimativa, levou-se em conta apenas o frete internacional. Para tanto, o que se tem é que, em média, o frete marítimo a granel gera 0,00000415 kg de CO_{2eq}/kg de produto transportado por km percorrido (UK, 2023).[9] Examinaram-se, então, três cenários:[10] i) o fertilizante químico é produzido nacionalmente, de maneira que não há frete internacional, tendo emissão nula para fins do modelo proposto; ii) o fertilizante químico é proveniente do Marrocos, com distância entre os portos de Jorf Lasfar e de Paranaguá[11] de aproximadamente

9. O fator de conversão considera o tamanho do navio. Para a estimativa em questão, consideraram-se navios que tenham peso morto entre 60 mil toneladas e 99 mil toneladas (deadweight – DWT), uma vez que os navios que transportam fertilizantes costumam levar entre 60 mil toneladas e 80 mil toneladas.
10. Além da produção nacional, os maiores fornecedores de fertilizantes fosfatados para o Brasil são Marrocos e Rússia.
11. Paranaguá foi o principal porto de entrada das importações de fertilizantes fosfatados no país em 2023 (24%).

10.014 km;[12] e iii) o fertilizante é proveniente da Rússia, com distância entre os portos de São Petersburgo e de Paranaguá de aproximadamente 15.657 km.

Todos os indicadores mencionados – mineração, industrialização e transporte – são utilizados sobre o peso do produto. Nesse sentido, foi preciso calcular a quantidade necessária do fosfato para a adubação de manutenção da soja no país (cerca de 2,8 milhões de toneladas) e considerar três cenários alternativos: i) economia máxima, em que se utiliza 60 kg de fosfato por hectare; ii) com limite superior de economia proporcionada pela SBF, de 50%; e iii) com limite inferior de economia proporcionada pela SBF, de 30%.

A partir das estimativas das emissões de CO_{2eq} foi possível encontrar a descarbonização potencial monetizada com a adoção da SBF. Conforme a tabela 6, a qual considera as diferenças entre a utilização máxima de fosfato e a utilização dos três cenários propostos, têm-se as estimativas correspondentes. Para monetizar a potencial descarbonização da SBF, considerou-se o valor de mercado do Crédito de Carbono Futuro (CFI2Z1), comercializado internacionalmente a R$ 437,70.[13] Ainda, cumpre esclarecer que um crédito de carbono corresponde à redução da emissão de uma tonelada de CO_{2eq}.

Na estimativa do potencial impacto econômico da SBF, há que se considerar o custo para aplicação do inoculante contendo os MSPs. O custo médio da aplicação do inoculante foi estimado em 0,5 saca de soja por hectare, considerando o preço de R$ 700 o litro do produto (BiomaPhos, no caso) no distribuidor e uma dose aplicada de 100ml/ha (Paiva, 2021d). Partindo dos mesmos valores utilizados para o cálculo do ganho de produtividade, o custo estimado com a adoção da SBF em toda a cultura de soja seria em torno de R$ 2,8 bilhões.

12. As distâncias foram calculadas a partir do site www.ports.com, e depois convertidas de milhas náuticas para quilômetros.

13. Em 29 de agosto de 2024, o crédito de carbono futuro (CFI2Z1) fechou o dia cotado a € 70,03, conforme dados da Investing (disponível em: https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions). Já o euro foi cotado, na mesma data, a R$,6,24, conforme dados do Banco Central do Brasil (2024).

TABELA 6
Estimativa de emissões de CO_{2eq} por setores e descarbonização potencial monetizada para diferentes cenários

Unidades	Variáveis	Dose aplicada de fosfato
Milhões de hectares	A_t	46,1
R$(kgCO$_{2eq}$)$^{-1}$	pc_t	0,4377
kgCO$_{2eq}$(kg)$^{-1}$	E_1	0,0085
	E_2	1,56
	E_3	0,00000415
	$E_1+E_2 = E_{total}$ (Brasil; 0 km)	1,569
	$E_1+E_2+(E_3.d) = E_{total}$ (Marrocos; 10.014 km)	1,610
	$E_1+E_2+(E_3.d) = E_{total}$ (Rússia; 15.657km)	1,633

Unidades	Cenários	Dose aplicada de fosfato		
		Economia máxima (100%)	limite superior (50% de economia)	limite inferior (30% de economia)
kg(ha)$^{-1}$	Q*	60	30	18
R$ milhões	Descarbonização potencial (Brasil)	1.901,0	950,5	570,3
	Descarbonização potencial (Marrocos)	1.951,3	975,7	585,4
	Descarbonização potencial (Rússia)	1.979,7	989,9	593,9

Fonte: Ibram (2024), Giegrich (2021), UK (2023), Investing (2024), Souza *et al*. (2016); e Conab (2024).
Elaboração dos autores.

Para melhor visualização dos potenciais ganhos a partir da utilização em larga escala da SBF, as estimativas referentes ao ganho de produtividade, mínimos e máximos, além da economia potencial com redução do uso de fertilizantes químicos e a utilização do estoque de fosfato no solo, com seus limites inferiores e superiores, foram consolidados na tabela 7, incluindo os correspondentes ganhos advindos da descarbonização, descontados os custos da aplicação dos inoculantes para ativar a SBF.

TABELA 7

Consolidação dos ganhos potenciais a partir da adoção em larga escala da SBF
(Em R$ bilhões/ano)

Parâmetro / Ganho	Aumento de produtividade		Economia com redução de fertilizantes (Economia potencial)		Uso do estoque de fosfato no solo (Economia potencial máxima)	
	Ganho médio		Limites		Variação	
	Mínimo	Máximo	Inferior (30%)	Superior (50%)	Mínima	Máxima
Economia potencial	17,7	31,3	6,0	17,5	20,1	35,0
Descarbonização potencial	-	-	0,6	1,0	1,9	2,0
Subtotal (sem custo de aplicação)	17,7	31,3	6,6	18,5	22,0	37,0
Total (com custo de aplicação)	14,9	31,3	3,8	15,7	19,2	34,2

Elaboração dos autores.
Obs.: O ganho potencial total considera, para todos os parâmetros, o custo com aplicação da SBF de R$ 2,8 bilhões.

Nota-se que o ganho potencial total é significativo independentemente do parâmetro escolhido (aumento de produtividade, economia com redução da fertilização de manutenção ou uso do estoque de fosfato do solo). Registra-se que, apesar de indícios, ainda não há estudos que suportam de forma categórica a soma dos montantes oriundos do aumento de produtividade com a economia proporcionada com a redução de fertilizantes ou com o uso do estoque de fosfato no solo.

Além disso, o uso do estoque de fosfato no solo deve ser considerado com cautela, uma vez que, se ultrapassar o limite mínimo, ele deverá ser recomposto em seguida, seja em relação à adubação de manutenção, seja frente à de correção. De qualquer forma, cada área necessita de uma mensuração própria para saber até que ponto se pode renunciar à adubação de fosfato.

Retornando aos valores estimados, apesar da quantia elevada de recursos, a comparação desses montantes com outros parâmetros auxilia na compreensão da magnitude que a disseminação da SBF pode ter.

A comparação natural e mais próxima que pode ser feita é entre a SBF e a FBN, pois ambas são bioprocessos que ajudam na melhor nutrição das plantas. A economia potencial gerada pela FBN vai além do ganho potencial total a ser gerado pela SBF. Isso ocorre, principalmente, pelo fato de a FBN ser, na cultura da soja, um substituo perfeito para a adubação química de nitrogênio, enquanto a SBF atua em associação

à adubação de fosfato, incrementando sua eficiência. No caso da SBF, portanto, são produtos complementares.

Consequentemente, a SBF sempre demandará a companhia de fosfato, seja de forma natural, seja por meio de adição. Já a FBN, por ser substituta perfeita do fertilizante nitrogenado, não demanda sua adição.

Além disso, os vegetais necessitam de uma maior quantidade de nitrogênio para se desenvolver no Brasil do que de fosfato (420 kg de nitrogênio por hectare contra uma dose de reposição de 45 kg de P_2O_5/ha, caso se deseje produzir 3,0 t de soja/ha em ambos os casos). Com a necessidade de nitrogênio sendo quase dez vezes a necessidade de fosfato, a tendência é que a FBN apresente naturalmente um impacto mais significativo que a SBF, seja em termos ambientais ou econômicos.[14]

Todavia, o efeito da SBF é potencializado em momentos de crise, quando os preços dos fertilizantes químicos disparam ou até há possibilidade de quebra da oferta desses produtos. Nesse sentido, a SBF pode até ser um substituto momentâneo dos fertilizantes fosfatados químicos.

Independentemente dos parâmetros utilizados, aumento de produtividade, economia com redução do uso de fertilizantes ou uso do estoque de fosfato no solo, os cenários sugerem que a adoção da SBF promova um ganho potencial cujo valor máximo atingiria R$ 34,2 bilhões (ou US$ 6,1 bilhões).[15] Esse valor equivale a 40,3% dos US$ 15 bilhões sugeridos, em 2020, para a FBN.

Contudo, alguns pontos devem ser destacados. Em primeiro lugar, os cálculos para estimar os ganhos com a FBN conjugaram o aumento de produtividade com a diminuição do uso de fertilizantes. Já no caso da SBF, a soma desses parâmetros ainda não pode ser realizada por carência de estudos que comprovem categoricamente a dupla ocorrência. Este estudo, portanto, optou por não somar esses parâmetros para a SBF.

14. Os fertilizantes nitrogenados são compostos de amônia e ureia, que são produzidas a partir de processos químicos que demandam muita energia. Usualmente, utiliza-se gás natural ou carvão, de maneira que é possível depreender que os fertilizantes nitrogenados gerem menos CO_{2eq} e poluam mais e que sejam mais caros que os fosfatados. Não obstante, foram apresentados números da FBN que demonstram que essa tecnologia é mais econômica e que contribui para despejar menos CO_{2eq} na atmosfera.

15. Em 30 de agosto de 2024, a cotação do dólar estava US$ 1 igual a R$ 5,65, conforme dados do Banco Central do Brasil (BCB).

Em segundo lugar, a FBN foi descoberta cinquenta anos antes da SBF, de maneira que a evolução daquela, como inovação e aprimoramento da inoculação de sementes e de produtos comerciais, está naturalmente em estágio de maturidade mais avançado que os correlatos da SBF. Os produtos contendo MSP começaram a ser produzidos no Brasil apenas a partir de 2019, enquanto a FBN já era utilizada no Brasil desde a década de 1970.

Nesse sentido, a evolução da utilização da FBN foi paulatina. Nos anos 2000 houve incremento mais significativo da sua utilização, em especial a partir de 2013 com a coinoculação. A economia estimada com a FBN saltou de US$ 7,2 bilhões, em 2010, para US$ 15,2 bilhões, em 2020. Percebe-se, portanto, que a FBN sofreu inovações incrementais ao longo do tempo.

É de se esperar que o mesmo possa ocorrer com a SBF. Aliás, é digno de nota destacar que se a economia gerada com FBN em 2010 foi de US$ 7,2 bilhões, em 2023, a economia potencial com SBF chegaria em US$ 6,1 bilhões. Embora a comparação mereça ajustes temporais, o que se quer observar é que o impacto potencial da SBF não está tão distante do impacto da FBN em estágio mais incipiente.

Ao mesmo tempo, o cálculo relativo à economia com o uso da SBF se deu apenas sobre a adubação de manutenção, desconsiderando a adubação corretiva. Esse fator restringe o tamanho do impacto da ação da SBF, pois a adubação corretiva tende a demandar maior fertilização, uma vez que, no geral, necessita-se de uma quantidade maior de fosfato para corrigir o solo do que para mantê-lo.

Quanto à utilização do estoque de P_2O_5 no solo, cumpre esclarecer que essa possibilidade acaba por ser uma vantagem em relação à FBN. A acumulação de fosfato no solo decorre justamente do problema gerado pela fixação do nutriente ao solo. Isso não ocorre com o nitrogênio, que é consumido pela planta ou é perdido por meio de ações naturais (lixiviação etc.). Por um lado, o solo não consegue fazer um "estoque" de nitrogênio, o qual necessita ser recomposto a cada nova safra, além da questão ambiental. Por outro lado, o solo consegue "estocar" fosfato, justamente em formato não solúvel. Dessa forma, seja o fosfato natural ou o proveniente de adubação, o solo consegue fazer uma "poupança", isto é, estoca-lo e carregá-lo de uma safra para a outra.

Isso significa que a SBF tornou possível consumir o fosfato estocado nos solos agricultáveis do país. Assim, em momentos de maiores volatilidades internacionais, com flutuação dos preços ou até mesmo com possiblidade de quebra na oferta de fertilizantes, a SBF possibilitaria que a agricultura brasileira sofresse menor flutuação.

Seguindo adiante, uma outra forma de avaliar o impacto da SBF é compará-la ao maior centro de pesquisa agropecuária do país, a Embrapa, justamente o berço das principais pesquisas relacionadas ao bioprocesso. Anualmente, a empresa lança seu balanço social, que estima os benefícios econômicos gerados para a sociedade (lucro social) a partir da incorporação, pelo setor produtivo, de soluções tecnológicas geradas pelas pesquisas desenvolvidas em suas 42 unidades.

Em 2023, o lucro social da empresa foi estimado em R$ 85,1 bilhões, tendo a FBN e a SBF contribuído, respectivamente, com R$ 26,6 bilhões e R$1,7 bilhões daquele montante (Embrapa, 2024). Tendo em vista o potencial estimado da SBF, o lucro social da Embrapa poderia ultrapassar os R$ 100 bilhões em breve, conforme difusão da SBF.

Para além da comparação da contribuição da SFB para o lucro social da Embrapa, é interessante compará-la também com o orçamento geral da empresa, que, em 2023, foi ligeiramente superior a R$ 4 bilhões (Embrapa, 2024). Isso significa que a contribuição social da SFB já equivale a 41% do orçamento anual da agência pública de pesquisa. Contudo, se for considerado o ganho potencial da SFB apenas em aumento de produtividade, estimado entre R$ 14,9 bilhões e R$ 28,5 bilhões, descontado o custo de aplicação, é possível dizer que os benefícios a serem gerados, anualmente, representariam de 3,7 a 7,1 vezes o orçamento da Embrapa.

No comparativo ao Plano Safra, cujos recursos apoiam a produção agropecuária e fortalece os sistemas de produção ambientalmente sustentáveis, para a safra 2024-2025, seu valor total foi de R$ 400,6 bilhões (Brasil, 2024b). Desse montante, o valor subsidiado com recursos diretos do Tesouro foi de R$ 16,3 bilhões (Brasil, 2024c). Esse valor é composto, tanto pelo custo do Plano Safra empresarial quanto pelo familiar. Constatou-se que o custo para se aplicar SBF em toda área cultivada de soja (R$ 2,8 bilhões) representaria 17,1% do orçamento direto do Tesouro no Plano Safra. Já os ganhos potenciais da SBF, apenas em relação ao aumento da produtividade, cobririam a subvenção direta da maior política pública para a agricultura do país em 91%, no cenário de menor crescimento de produtividade (R$ 14,9 bilhões), e superariam o valor subsidiado em 174,7% no melhor cenário.

Além da comparação com o orçamento alocado para políticas públicas, uma outra forma de avaliar o impacto dos potenciais ganhos da SBF seria compará-los a dados macroeconômicos. Considerando que o valor bruto da produção de soja foi de R$ 348,7 bilhões em 2023 (IBGE, 2024c), a utilização em larga escala da SBF geraria

um ganho extra estimado entre 4,3% e 8,2% desse montante, apenas com o aumento da produtividade, considerando os custos de aplicação dos inoculantes.

Em relação ao fluxo de comércio exterior, a agricultura foi responsável por 49,0% das exportações brasileiras em 2023, o equivalente a US$ 166,6 bilhões (Brasil, 2024a). Dessa forma, os potenciais ganhos advindos da SBF corresponderiam até 3,0% das exportações agrícolas brasileiras.[16]

É possível, também, situar a possível abrangência da SBF em escala geográfica. A área para o cultivo da soja no Brasil equivale a 72% dos 638 mil km2 do território francês, por exemplo. Essa escala de abrangência geográfica dá magnitude ao desafio de se escalar a SBF para todo o plantio de soja, como também destaca a capilaridade que o impacto desencadeado a partir de um bioinsumo possa ter.

No que diz respeito à descarbonização, a SBF contribuiria com a redução de 1,3 milhão a 4,5 milhões de toneladas de CO_{2eq}, o que corresponderia, respectivamente, a R$ 570,3 milhões e R$ 2,0 bilhões. Ao comparar o potencial de descarbonização da economia com a adoção da SBF com outros projetos, percebe-se que seu impacto pode ser significativo. A Hidrelétrica de Itaipu, por exemplo, estima evitar a emissão de 39 milhões de toneladas de CO_{2eq} por ano, caso sua energia elétrica fosse gerada a partir do uso de gás natural (Itaipu Binacional, 2020). Isso significa que o potencial da SBF equivaleria de 3,3% a 11,5% do impacto de uma das maiores hidrelétricas do mundo em relação à descarbonização.

Outra comparação interessante é em relação ao uso de etanol como combustível, em substituição à gasolina. Estima-se que, entre março de 2003 e maio de 2020, tenha-se evitado a emissão de mais de 515 milhões de toneladas de CO_{2eq} na atmosfera (Unica, 2020). A média anual seria em torno de 30 milhões de toneladas de CO_{2eq}, de maneira que a SBF contribuiria de 4,3% a 15,0% do impacto que a substituição da gasolina pelo etanol apresentou.

Entretanto, em relação à descarbonização proporcionada pela SBF, a melhor comparação é em relação à quantidade de soja a ser produzida com a correspondente emissão de CO_{2eq}. Em 1980, por exemplo, o Brasil produziu 14,9 milhões de toneladas de soja. Para a adubação de manutenção dessa produção, teriam sido necessárias 525,4 mil de toneladas de fosfato, as quais teriam emitido 845,9 mil toneladas de CO_{2eq}. Isso significa que, naquele ano, foram produzidas 17,6 toneladas de soja para cada

16. Em 30 de agosto de 2024, a cotação do dólar estava US$ 1 igual a R$ 5,65, conforme dados do BCB.

tonelada de CO_{2eq}. Já em 2024, a produção de soja foi de 147,7 toneladas, enquanto a emissão relativa à adubação de manutenção de fosfato seria de 4,5 milhões de toneladas de CO_{2eq}. Assim, nesse ano, produziu-se cerca de 33,1 toneladas de soja para cada tonelada de CO_{2eq} emitido. Percebe-se, portanto, que a relação produção por emissão praticamente dobrou nesse período.

A tabela 8 monstra a evolução, ao longo do tempo, da relação entre a produção de soja e a emissão de CO_{2eq} oriunda da adubação de manutenção de fosfato. Destacam-se as linhas relativas aos limites inferior e superior, os quais dizem respeito à economia que a SBF poderia ter proporcionado no passado, a uma distância estimada de importação de fosfato de 10.014 km (Marrocos). Evidentemente, não havia produtos comerciais disponíveis contendo MSP. Contudo, a tabela monstra o quanto que a SBF poderia ter contribuído com a descarbonização da cultura de soja.

TABELA 8
Evolução da relação entre produção de soja e emissão de CO_{2eq} oriunda da adubação de manutenção de fosfato

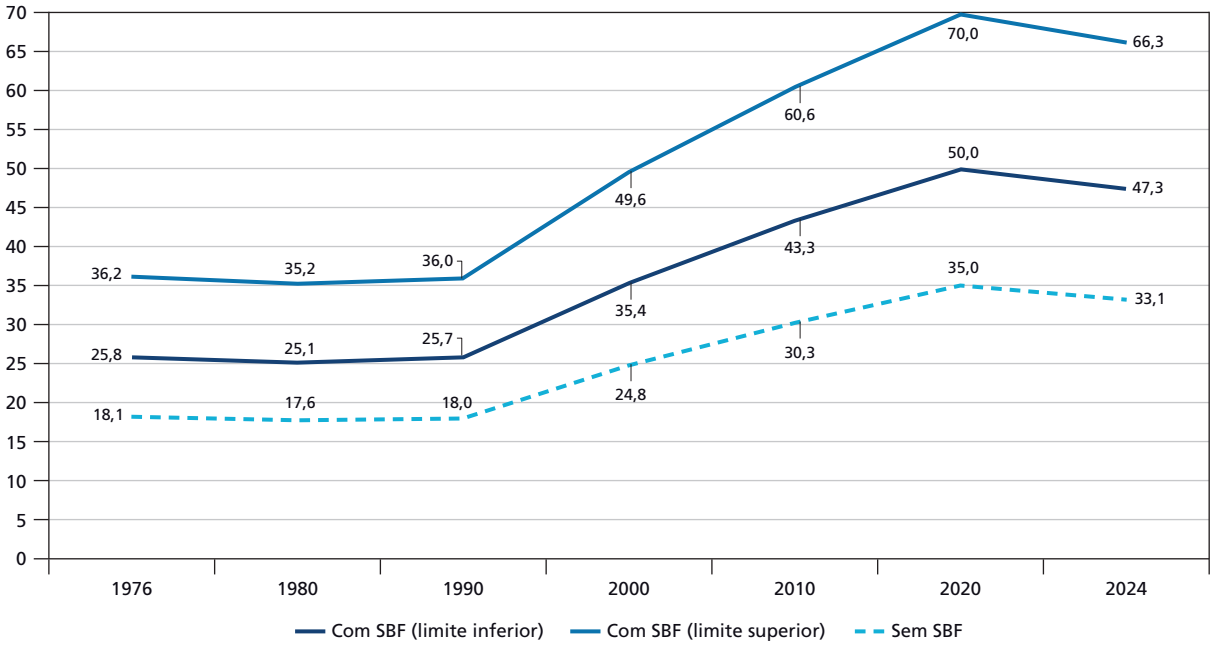
Variáveis	Unidades	1976	1980	1990	2000	2010	2020	2024
Produção	Milhões de toneladas	12,1	14,9	20,1	32,3	68,7	125,9	147,7
Área	Milhões de hectares	6,9	8,8	11,6	13,6	23,5	37,2	46,1
Fosfato necessário para adubação de manutenção (60 kg)	Milhões de toneladas	0,4	0,5	0,7	0,8	1,4	2,2	2,8
Total de CO_{2eq} emitido	Milhões de toneladas	0,7	0,8	1,1	1,3	2,3	3,6	4,5
Produção de soja por emissão de CO_{2eq}	Soja/CO_{2eq}	18,1	17,6	18,0	24,8	30,3	35,0	33,1
Total de CO_{2eq} emitido (limite inferior – 30% de economia)	Milhões de toneladas	0,5	0,6	0,8	0,9	1,6	2,5	3,1
Produção de soja por emissão de CO_{2eq} (limite inferior)	Soja/CO_{2eq}	25,8	25,1	25,7	35,4	43,3	50,0	47,3
Total de CO_{2eq} emitido (limite superior – 50% de economia)	Milhões de toneladas	0,3	0,4	0,6	0,7	1,1	1,8	2,2
Produção de soja por emissão de CO_{2eq} (limite superior)	Soja/CO_{2eq}	36,2	35,2	36,0	49,6	60,6	70,0	66,3

Fonte: Ibram (2024), Giegrich (2021), UK (2023), Investing, 2024 (disponível em: https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions), Souza *et al*. (2016); e Conab (2024).
Elaboração dos autores.

De acordo com o gráfico 5, tem-se a produção de soja por emissão de CO_{2eq}. Pode-se observar que a SBF poderia ter antecipado a descarbonização entre vinte e quarenta anos, analisando os anos de 1980, 2000 e 2020. No cenário sem economia com SBF, em 2020, seriam produzidos 35 kg de soja para cada kg CO_{2eq}. No cenário com economia de 30% (limite inferior), essa produção já seria atingida em 2000, enquanto, no cenário com economia de 50% (limite superior), o ponto de produção se daria bem antes, em 1980. Isso significa que, em termos de adubação de manutenção de fosfato, a SBF poderia ter antecipado o alcance da descarbonização da lavoura de soja há bastante tempo.

GRÁFICO 5

Evolução da produção de soja (kg) por emissão (kg/CO_{2eq}) com e sem SBF de 1976 a 2024



Fonte: Ibram (2024), Giegrich (2021), UK (2023), Souza *et al*. (2016); e Conab (2024). Elaboração dos autores.

Este estudo foi exitoso, já que quantificou o impacto potencial que a adoção em larga escala da SBF pode apresentar, no Brasil e no cultivo de soja, seja pelo lado financeiro, seja pelo lado ambiental. Embora a SBF ainda não ofereça o mesmo impacto já alcançado pela FBN, a tecnologia se mostra promissora, mesmo que em estágios iniciais de difusão. A SBF já apresenta ganho real econômico com viés de crescimento, tanto por poupar fatores escassos quanto por aumentar a produtividade. Ao longo do tempo, a tendência é que esses ganhos sejam ampliados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eficiência da ação dos MSPs na solubilização do fosfato pode variar significativamente, de acordo com diversos fatores, como as boas práticas de inoculação, a qualidade do produto, as condições climáticas, o pH do solo, a sua composição microbiana e a presença de outros nutrientes, incluindo o nível adequado de fosfato que garanta um bom plantio. Dessa forma, as conclusões do estudo podem não ser aplicáveis a todas as regiões agrícolas do Brasil sem ajustes específicos.

De uma maneira ou de outra, as estimativas realizadas indicam que a aplicação dos inoculantes contendo MSP em larga escala na cultura da soja no país teria impactos relevantes, sobretudo no aumento da produção. Contudo, seu custo não é desprezível e precisa ser considerado nas análises de custo-benefício.

Em relação à economia potencial com a redução do uso de fertilizantes químicos, ela é promissora, mas depende de vários fatores, incluindo o preço dos fertilizantes e a eficiência da SBF em diferentes condições de solo e clima. Um ponto muito interessante é o fato de a SBF possibilitar que o agricultor prescinda de fertilização de fosfato em períodos de estresse, podendo ser um "substituto momentâneo" para aproveitar a poupança de fosfato do solo.

Este estudo também avaliou o impacto das estimativas encontradas em decorrência de eventual uso maciço da SBF em comparação com outras políticas públicas e parâmetros diversos. O uso de inoculantes que potencializam a FBN estão em um estágio de maturidade mais avançado em comparação com a SBF, de maneira que a comparação de performance deve levar em conta os diferentes estágios de desenvolvimento.

No que tange especificamente à potencial descarbonização a ser promovida a partir da intensificação do uso da SBF, a comparação com outros projetos mostra que o impacto da SBF tende a não ser muito expressivo, muito embora seu nível de investimento também seja consideravelmente menor. De toda forma, o aumento da produtividade ao longo dos últimos cinquenta anos promoveu uma diminuição da pegada de carbono do cultivo de soja. Com a SBF, o nível de descarbonização relativa à adubação de manutenção de fosfato poderia ter sido alcançado, pelo menos, vinte anos antes.

A avaliação passou pela comparação entre os ganhos potenciais da SBF e dados macroeconômicos (exportações do agronegócio), dados setoriais (receita da produção de soja) e com políticas públicas, como os recursos do tesouro que custeiam o Plano

Safra, o lucro social e o orçamento da Embrapa, além de contrapor o potencial de redução de emissão de CO_{2eq} em relação à energia pela hidrelétrica e à substituição da gasolina pelo etanol em motores à combustão. Foi possível, também, sistematizar o conhecimento e a estatística em torno da SBF, em forma de pesquisa exploratória.

Em relação a pesquisas futuras, seria possível replicar a metodologia deste estudo para outros cultivos. A Embrapa publicou uma série de estudos em que confirma o aumento da produtividade em várias culturas com o uso da tecnologia. Para o milho, o ganho de produtividade médio foi de 8,6% (Paiva, 2020b). Já para a cana de açúcar (Paiva, 2020b) e para o feijão (Bittencourt *et al*., 2022), foi possível observar ganho de produtividade associado ao uso da SBF em conjunto com a metade da adubação fosfatada recomendada.

Eventualmente, seria possível quantificar o impacto econômico de outros bioinsumos, os quais têm ficado cada vez mais em evidência. Além disso, seria possível aprofundar análises referentes ao nível de reposição de fosfato para lavouras de soja que não estejam apenas no Cerrado e quantificar possíveis economias com a utilização, por meio da SBF, do estoque de fosfato no solo.

Ressalta-se a carência de pesquisas que quantifiquem a possibilidade de redução de fertilizantes em decorrência da SBF, especialmente considerando a agricultura tropical praticada no Brasil, e que atestem sua correlação com o aumento da produtividade. Outra discussão que pode ser aprofundada é em relação aos custos de desenvolvimento de tecnologias associadas ao agronegócio por meio de investimentos públicos. Este trabalho demonstrou que a SBF se paga em termos de lucro social e, em breve, seus benefícios devem superar todo o orçamento da Embrapa.

Por fim, este Texto para Discussão demonstrou que o impacto potencial desse bioinsumo pode ser significativo, mesmo para um setor tão pujante e moderno como o da agricultura nacional. Portanto, espera-se que isso incentive, não apenas a utilização em massa da SBF como também o fomento de pesquisas, tecnologias e inovações relacionadas a outros bioinsumos, seja especificamente na seara da nutrição de planta, seja em outros elos da cadeia do agronegócio no país.

REFERÊNCIAS

ABISOLO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL. **Fertilizantes especiais apresentaram crescimento em 2023**. Campinas, 18 mai. 2024. Disponível em: https://www.abisolo.com.br/release/fertilizantes-especiais-apresentaram-crescimento-em-2023/.

ABIA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS. **Relatório Anual 2023**. São Paulo: Abia, 2023. Disponível em: https://www.abia.org.br/vsn/temp/z2023417RelatorioAnual2023interativoFINAL.pdf.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Pesquisa Setorial**. Disponível em: https://anda.org.br/recursos/.

BERNARDI, Alberto Carlos; MACHADO, Pedro Luiz; SILVA, Carlos Alberto. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. *In*: MANZATTO, Celso; FREITAS JUNIOR, Elias de; PERES, José Roberto. (Ed). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002, p. 61-77.

BINI, Daniel; LOPEZ, Maryeimy Varón. Transformações microbianas do fósforo. *In*: CARDOSO, Elke Jurandy; ANDREOTE, Fernando Dini (Ed.). **Microbiologia do solo**. Piracicaba: ESALQ, 2016. p. 149-166.

BITTENCOURT, Caroline Domingos *et al*. Desempenho de inoculante solubilizador de fosfato no crescimento e produção do feijoeiro-comum (Phaseolus vulgaris L.). *In*: SEMINÁRIO JOVENS TALENTOS, 16., 2022, Santo Antônio de Goiás. **Resumos**... Brasília: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018. Estabelece regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura. **Diário Oficial**, Brasília, 10 ago. 2018.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília, SDIC/MDIC, 2023.

_____. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Exportações do agronegócio fecham 2023 com US$ 166,55 bilhões em vendas**. Brasília, 16 jan. 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/exportacoes-do-agronegocio-fecham-2023-com-us-166-55-bilhoes-em-vendas.

_____. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano Safra 2024/2025**. Brasília: Mapa, 2024b.

_____. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Plano Safra 2023/2024:** apresentação. Brasília, Mapa, 2024c.

CALIGARIS, Bruno Santos Abreu *et al*. A Importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 1-6, 2022.

_____. **Agricultura, fertilizantes e solubilização biológica de fosfato**: a próxima revolução no campo. 2024. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2024.

CANÇADO, Geraldo Magela de Almeida *et al*. **Utilização de inoculante líquido solubilizador de fosfato formulado a base dos isolados de *Bacillus megaterium* (b119) *Bacillus subtilis* (b2084) no plantio da cana-de-açúcar**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, nov. 2021. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 49).

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Mercado de trabalho do agronegócio brasileiro**. Piracicaba; Brasília: Cepea; CNA, mar. 2024a. Disponível em:www.cepea.org.br/br/analises-trimestrais-nova-metodologia.aspx.

_____. **PIB do agronegócio**. Piracicaba; Brasília: Cepea; CNA, jul. 2024b.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica da soja**. Brasília: Conab, 2024. Disponível em: https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html.

CONSTANTINO, Vera Regina. **Tem fósforo no palito?** São Paulo: CRQSP. 10 dez. 2019. Disponível em: https:// crqsp.org.br/elementos-quimicos-fosforo/.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Balanço Social 2023**. 27ª ed. Brasília: Embrapa, 2024. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1163847/1/BS-2023.pdf.

GIEGRICH, Jürgen. **Manual da calculadora de emissões de GEE para resíduos**. Brasília: MDR; GIZ, 2021.

GLOBALFERT. **Principais empresas produtoras de fertilizantes no mundo em 2022**. [s.l.]: Globalfert, 19 out. 2022.

_____. **Outlook GlobalFert 2024**. [s.l.]: Globalfert, mai. 2024.

GRANADA, Camille *et al*. Is phosphate solubilization the forgotten child of plant growth-promoting rhizobacteria? **Frontiers in Microbiology**, v. 9, Sept. 2018.

HUNGRIA, Mariangela; CAMPO, Rubens José; MENDES, Iêda Carvalho. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2001. (Circular Técnica Embrapa Soja, n. 35; Embrapa Cerrados, n. 13).

_____ **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa, jun. 2007. (Documentos, n. 283).

HUNGRIA, Mariangela; NOGUEIRA, Marco Antonio; ARAUJO, Ricardo Silva. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, n. 7, p. 791-801, Oct. 2013.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – PNAD Contínua.** Rio de Janeiro: IBGE, 2024a.

_____. **IBGE explica o PIB**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024b. Disponível em: https:// www.ibge.gov.br/explica/pib.php.

_____. **Ranking agrícola**: valor da produção (2023). Rio de Janeiro: IBGE, 2024c. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa do setor mineral** – Ano base 2022. Brasília: Ibram, 2024.

ITAIPU BINACIONAL. **Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos** – Estudo de caso: Itaipu e o ODS 13. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2020. Disponível em: https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/af_df/Estudo_de_caso_Itaipu_ODS_13.pdf.

LAVAKUSH, Janardan Yadav *et al*. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (Oryza sativa). **Ecological Engineering**, v, 62, p. 123-128, Jan. 2014.

MARIN, Victor Augustus *et al*. **Fixação biológica de nitrogênio**: bactérias fixadoras de nitrogênio de importância para a agricultura tropical. Seropédica: Embrapa-CNPAB, 1999, 24p. (Série Embrapa-CNPAB. Documentos, n. 91). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/598661.

MARIN, Rosidelma da Silva *et al*. Efeito da adubação fosfatada na produção de sementes de soja. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 265-274, jun. 2015.

MCKINSEY & COMPANY. **Global Farmers Insights 2024**: a mente do agricultor brasileiro. [s.l.]: McKinsey, mar. 2024.

MENDES, Iêda de Carvalho; REIS JUNIOR, Fábio Bueno. **Microorganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos**: uma análise crítica. Planaltina: Embrapa, abr. 2003. (Documentos, n. 85).

OGINO, Cristiane Mitie; GASQUES, José Garcia; VIEIRA FILHO, José Eustáquio. **Relação dinâmica**: fertilizantes minerais e agricultura brasileira. Brasília: Ipea, 2023. (Texto para Discussão, n. 2928).

PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira *et al*. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 9, p. 1782-1787, Sept. 2009.

PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira *et al*. **Recomendação agronômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, fev. 2020a. (Circular Técnica, n. 260).

PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira *et al*. **Viabilidade técnica e econômica do BiomaPhos (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de milho e soja**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, nov. 2020b. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 210).

PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira *et al*. **Inoculantes à base de bactérias solubilizadoras de fosfato nas culturas do milho e da soja (BiomaPhos)**: dúvidas frequentes e boas práticas de inoculação. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, out. 2021a. (Comunicado Técnico, n. 252).

PAIVA, Christiane Abreu de Oliveira *et al*. **Validação da recomendação para o uso do inoculante BiomaPhos (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura da soja**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, nov. 2021b. (Circular Técnica 279).

PATIL, Praveen *et al*. Effect of phosphate solubilizing fungi and phosphorus levels on growth, yield and nutrient content in maize (Zea mays). **Karnataka Journal of Agricultural Sciences**, v.25, n.1, p. 58-62, Feb. 2012.

PAVINATO, Paulo Sergio *et al*. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020.

SANTOS, Mariane Sanches; NOGUEIRA, Marco Antonio.; HUNGRIA, Mariangela. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Expr**, v. 9, Dec. 2019.

_____. Oustanding impact of *Azospirillum brasiliense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: lessonsthat farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 24 Feb. 2021.

SOUZA, Djalma Maranhão *et al*. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no cerrado**. Planaltina: Embrapa, jun. 2016. (Circular Técnica n. 33).

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

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. Uso do etanol evita 515 milhões de toneladas de CO2. **Unica**, 5 jun. 2020. Disponível em: https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evita-515-milhoes-de-toneladas-de-co2-na-atmosfera/.

UK – UNITED KINGDOM. Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023. **Gov.UK**, Jun. 2023.

VASCONCELOS, Maria José Vilaça de; FIGUEIREDO, José Edson Fontes; OLIVEIRA, Maurílio Fernandes de. **Estudos bioquímicos e morfológicos em genótipos de milho contrastantes para a eficiência do uso de fósforo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, set. 2021. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 228).

WANG, Z. *et al*. Screening of phosphate-solubilizing bacteria and their abilities of phosphorus solubilization and wheat growth promotion. **BMC Microbiology**, v. 22, n. 296, 2022.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Coordenação
Aeromilson Trajano de Mesquita

Assistentes da Coordenação
Rafael Augusto Ferreira Cardoso
Samuel Elias de Souza

Supervisão
Aline Cristine Torres da Silva Martins

Revisão
Bruna Oliveira Ranquine da Rocha
Carlos Eduardo Gonçalves de Melo
Crislayne Andrade de Araújo
Elaine Oliveira Couto
Luciana Bastos Dias
Vivian Barros Volotão Santos
Luíza Cardoso Mendes Velasco (estagiária)

Editoração
Aline Cristine Torres da Silva Martins
Camila Guimarães Simas
Leonardo Simão Lago Alvite
Mayara Barros da Mota

Capa
Aline Cristine Torres da Silva Martins

Projeto Gráfico
Aline Cristine Torres da Silva Martins

The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.

Acesse nossas publicações

Acompanhe nossas redes sociais

Composto em roboto regular 10/12 (texto)
Roboto regular, bold, black 12/14 (títulos)
Roboto regular 10 (gráficos e tabelas)
Rio de Janeiro-RJ

Logotipo/slogan de governo removido em observancia ao disposto no art. 40 da Lei n 9.504/1997

Missão do Ipea

Qualificar a tomada de decisão do Estado e o debate público.

ISSN 1415-4765

ipea Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO