



Fixação Biológica de Nitrogênio no Contexto da Agricultura Sustentável

Biological Nitrogen Fixation in the Context of Sustainable Agriculture

Joilson Silva Ferreira

Rayka Kristian Alves Santos

Edeilton Borges dos Santos

Lucas Carvalho Paiva

Bárbara Caires Brito

Resumo: A intensificação da produção agrícola, baseada no uso de fertilizantes minerais, tem proporcionado ganhos de produtividade, porém também tem contribuído para impactos ambientais, como a degradação do solo, a contaminação de recursos hídricos e a emissão de gases de efeito estufa. Nesse cenário, a agricultura sustentável consolida-se como um modelo produtivo orientado pela eficiência no uso de insumos, pela conservação dos recursos naturais e pela valorização de processos biológicos no funcionamento dos agroecossistemas. A microbiota do solo desempenha papel central na manutenção da fertilidade, na ciclagem de nutrientes e na estabilidade estrutural do solo, sendo a diversidade microbiana associada à resiliência dos sistemas agrícolas e à eficiência na assimilação de nutrientes. Entre os processos biológicos, destaca-se a fixação biológica de nitrogênio (FBN), que reduz a dependência de fertilizantes nitrogenados minerais e os impactos ambientais associados ao seu uso. Práticas de manejo conservacionistas, como a rotação e o consórcio de culturas, a manutenção da cobertura vegetal e da matéria orgânica do solo, o uso de inoculantes microbianos, favorecem o estabelecimento de comunidades microbianas mais diversas e funcionalmente ativas, contribuindo para a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Em culturas não leguminosas, como o milho, bactérias diazotróficas associativas contribuem de forma complementar para o suprimento de nitrogênio, além de promover efeitos indiretos relacionados ao crescimento vegetal e à eficiência de uso de nutrientes, reforçando o papel da integração entre diversidade microbiana, FBN e manejo sustentável na construção de sistemas agrícolas mais produtivos e alinhados à agricultura de baixo carbono.

Palavras-chave: fertilizantes minerais; insumos químicos; agricultura.

Abstract: The intensification of agricultural production, based on the use of mineral fertilizers, has led to productivity gains; however, it has also contributed to environmental impacts such as soil degradation, contamination of water resources, and greenhouse gas emissions. In this context, sustainable agriculture has become established as a production model focused on efficient input use, conservation of natural resources, and the enhancement of biological processes involved in agroecosystem functioning. Soil microbiota play a central role in maintaining fertility, nutrient cycling, and soil structural stability, with microbial diversity being associated with the resilience of agricultural systems and efficient nutrient uptake. Among these biological processes, biological nitrogen fixation (BNF) stands out for reducing dependence on mineral nitrogen fertilizers and the environmental impacts associated with their use. Conservation management practices, such as crop rotation and intercropping, maintenance of soil cover and organic matter, and the use of microbial inoculants, promote the establishment

of more diverse and functionally active microbial communities, contributing to improvements in the chemical, physical, and biological properties of the soil. In non-leguminous crops, such as maize, associative diazotrophic bacteria contribute complementarily to nitrogen supply while also promoting indirect effects related to plant growth and nutrient use efficiency, reinforcing the role of integrating microbial diversity, BNF, and sustainable management in developing more productive agricultural systems aligned with low-carbon agriculture.

Keywords: mineral fertilizers; chemical inputs; agriculture.

INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas agrícolas nas últimas décadas, fundamentada no uso de fertilizantes minerais e outros insumos químicos, permitiu expressivos avanços na produtividade, porém trouxe consigo desafios relacionados à sustentabilidade ambiental, à degradação dos solos e à eficiência no uso de recursos naturais. Em um cenário marcado pelo crescimento populacional, pela pressão sobre os ecossistemas e pela necessidade de mitigar impactos ambientais associados à produção de alimentos, torna-se indispensável a adoção de estratégias que conciliem elevada produtividade agrícola com conservação ambiental e viabilidade econômica (Pandey; Saharan, 2025).

Nesse contexto, a agricultura sustentável emerge como uma alternativa que busca racionalizar o uso de insumos, preservar a qualidade do solo e da água, reduzir a dependência de fertilizantes sintéticos e fortalecer os serviços ecossistêmicos. Entre as abordagens que integram esse modelo, destaca-se o uso de microrganismos benéficos, cuja atuação está diretamente relacionada à melhoria da fertilidade do solo, à promoção do crescimento vegetal e à otimização dos ciclos biogeoquímicos. A microbiota do solo desempenha papel central nesses processos, influenciando a disponibilidade de nutrientes, a estrutura física do solo e a resiliência dos agroecossistemas frente a estresses bióticos e abióticos (Rossi *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025).

Dentre os processos biológicos de maior relevância para a sustentabilidade agrícola, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) assume posição de destaque, por possibilitar a conversão do nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados minerais. No Brasil, a FBN consolidou-se como uma das principais tecnologias biológicas aplicadas à agricultura, especialmente na cultura da soja, onde associações simbióticas altamente eficientes com rizóbios permitem suprir praticamente toda a demanda de nitrogênio da cultura. Em plantas não leguminosas, como o milho, a FBN associativa também tem demonstrado potencial relevante, sobretudo quando integrada a práticas de manejo sustentável e ao uso de inoculantes microbianos (Moretti *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

Dessa forma, a compreensão da diversidade microbiana do solo, dos mecanismos que regulam a fixação biológica de nitrogênio e das práticas de manejo que favorecem esses processos é essencial para o desenvolvimento de

sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis. A análise dos fundamentos da agricultura sustentável, da importância da microbiota do solo e do papel da fixação biológica de nitrogênio na qualidade do solo e na nutrição das plantas, bem como das evidências científicas relacionadas à aplicação da FBN nas culturas da soja e do milho, contribui para o entendimento desses processos no contexto brasileiro (Galindo *et al.*, 2024).

FUNDAMENTOS DA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL E REDUÇÃO DO USO DE FERTILIZANTES

A intensificação da produção agrícola ao longo das últimas décadas, fortemente baseada no uso de insumos químicos, tem suscitado crescentes preocupações relacionadas à sustentabilidade ambiental, à degradação dos recursos naturais e à segurança alimentar em um cenário de contínuo crescimento populacional (Rempelos *et al.*, 2023). Esse contexto impõe desafios significativos à agricultura convencional, especialmente no que se refere à necessidade de conciliar o aumento da produtividade com a redução dos impactos ambientais. Dessa forma, fazem-se necessárias transformações nos sistemas produtivos, com a adoção de práticas que promovam maior equilíbrio entre a produção de alimentos, a conservação dos recursos naturais e a manutenção dos serviços ecossistêmicos (Chataut *et al.*, 2023).

A agricultura sustentável surge como um modelo produtivo fundamentado na racionalização do uso de recursos naturais, na conservação do solo e da água, na preservação da biodiversidade e na redução da dependência de insumos externos (Çakmakçı *et al.*, 2025). Entre seus princípios centrais destacam-se a eficiência no uso de insumos agrícolas, a ciclagem de nutrientes, o aproveitamento de resíduos orgânicos e a priorização de insumos biológicos. Tais estratégias visam não apenas à mitigação dos impactos ambientais, mas também à construção de sistemas agrícolas mais resilientes, estáveis e economicamente viáveis a longo prazo (Pradhan *et al.*, 2025).

Dentre as tecnologias associadas à agricultura sustentável, o uso de microrganismos benéficos tem se destacado como uma alternativa promissora para a promoção do crescimento vegetal, a melhoria da fertilidade do solo e o manejo integrado de pragas e doenças (Silva *et al.*, 2025). Esses microrganismos, conhecidos como promotores de crescimento de plantas (PCPs), atuam por diferentes mecanismos, incluindo a fixação biológica de nitrogênio, a solubilização e mobilização de nutrientes, a produção de fitormônios, o antagonismo a patógenos e a indução de tolerância a estresses abióticos, como déficit hídrico e salinidade (Zanetti *et al.*, 2023).

A crescente preocupação com os impactos negativos associados ao uso intensivo de fertilizantes minerais, tais como a elevação dos custos de produção, a acidificação do solo, a contaminação de corpos d'água e a emissão de gases de efeito estufa reforça a necessidade de estratégias que promovam a redução do uso

desses insumos. O manejo inadequado de fertilizantes, especialmente nitrogenados e fosfatados, contribui para a eutrofização de ambientes aquáticos e para perdas significativas de nutrientes por volatilização e lixiviação, comprometendo a eficiência agrônômica e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Menegat *et al.*, 2022; Chataut *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a utilização de microrganismos na agricultura constitui uma abordagem sustentável para reduzir a dependência de fertilizantes químicos, sem comprometer o desempenho produtivo das culturas. Gêneros de bactérias como *Azospirillum*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Rhizobium* e *Pseudomonas* são amplamente estudados e utilizados devido à sua capacidade de melhorar a nutrição das plantas, estimular o desenvolvimento radicular e aumentar a eficiência de uso de nutrientes (Pascutti *et al.*, 2024). Além disso, esses microrganismos contribuem para a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, favorecendo a estruturação, a atividade microbiana e a ciclagem de nutrientes (Slama *et al.*, 2023).

Portanto, a integração do uso de microrganismos aos sistemas agrícolas sustentáveis representa uma estratégia eficaz para a promoção da saúde dos agroecossistemas, a redução dos impactos ambientais e o fortalecimento da sustentabilidade da produção agrícola. Ao minimizar a necessidade de fertilizantes químicos e reduzir os riscos de contaminação ambiental, essa abordagem contribui para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e alinhados aos princípios da agricultura sustentável.

Vários trabalhos em culturas não leguminosas já foram desenvolvidos e mostraram a eficiência na nutrição e crescimento de plantas mostrando a eficiência na redução do uso de adubação, em eucalipto, arroz, milho, feijão-caupi (Santos *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2021; Loureiro *et al.*, 2021; Jesus *et al.*, 2023; Prata *et al.*, 2025;).

DIVERSIDADE MICROBIANA NO SOLO

Na agricultura moderna, a sustentabilidade tornou-se um pilar fundamental dos sistemas de produção motivada pela necessidade, tanto de produtores quanto de pesquisadores, de preservar e/ou restaurar a qualidade do ambiente de cultivo, especialmente do solo. Nesse contexto, a microbiota do solo desempenha papel fundamental, influenciando diretamente a manutenção da sua fertilidade e estrutura. O termo refere-se ao conjunto de microrganismos funcionais, diferenciados por tipo ou espécie, que atuam de maneira individual ou em comunidade, contribuindo para os processos biológicos essenciais à plena funcionalidade do sistema edáfico (Pereira *et al.*, 2024).

Esses microrganismos, quando presentes nos solos, seja de forma natural ou por meio do manejo via inoculantes, resultam no condicionamento de um ambiente favorável ao desenvolvimento vegetativo e à expressão do potencial produtivo de culturas agrícolas (Lopes *et al.*, 2021). Segundo Bald *et al.* (2021), um solo de qualidade que apresenta condições adequadas ao desenvolvimento possui em sua

composição biológica quantidades elevadas de bactérias, actinomicetos, fungos, algas e protozoários, os quais são responsáveis por cerca de 4% do carbono total, ocupando em média 5% dos espaços porosos deste solo.

Considerando os fungos e bactérias como os principais grupos de microrganismos responsáveis pela atividade microbiana do solo, estima-se que cerca de 23% das bactérias e 10% dos fungos encontram-se em um estado funcional, realizando processos biológicos importantes para a manutenção do ambiente (Bald *et al.*, 2021). Essa fração funcionalmente ativa da microbiota não apenas participa dos ciclos biogeoquímicos do solo, mas também exerce papel fundamental nas interações com as plantas, influenciando diretamente sua nutrição e desenvolvimento.

De maneira direta, a microbiota do solo, por meio de suas associações com as plantas, promove aumento significativo na taxa de assimilação de nutrientes, ao disponibilizá-los em formas prontamente absorvíveis pelo sistema radicular. Esse efeito decorre de processos como a fixação biológica do nitrogênio atmosférico, a solubilização do fósforo presente na forma de fosfato, a disponibilização de ferro mediada pela produção de compostos sideróforos e a síntese e ação de fitormônios, como auxinas e citocininas (Rezende *et al.*, 2021). Essas interações também podem favorecer o sistema de defesa das culturas, pois alguns microrganismos apresentam a capacidade de limitar a infecção e colonização de fitopatógenos, reduzindo a incidência e a severidade das doenças (Garcia *et al.*, 2024).

Nos sistemas agrícolas que priorizam as bases da sustentabilidade, a promoção da diversidade microbiana é favorecida pela utilização de práticas conservacionistas que visam minimizar os impactos sobre a biota do solo. O cultivo mínimo, a rotação e consorciação de culturas, o uso de adubação verde e a aplicação de resíduos orgânicos são exemplos de manejos que estimulam o aumento da biomassa microbiana e da diversidade funcional. Essas práticas reduzem a dependência de insumos sintéticos e promovem o equilíbrio ecológico, permitindo o desenvolvimento de comunidades microbianas mais complexas e estáveis, capazes de sustentar a produtividade a longo prazo sem comprometer a integridade do ambiente (Pascutti *et al.*, 2024).

A presença de uma microbiota diversificada também está associada à redundância funcional, característica ecológica que confere maior resiliência ao sistema edáfico. Essa redundância garante que diferentes espécies microbianas desempenhem funções semelhantes, de modo que, em caso de distúrbios ou perdas populacionais, outras espécies possam manter as atividades essenciais do solo (Ramos *et al.*, 2018; Tomazelli *et al.*, 2024). Dessa forma, solos com alta diversidade apresentam maior capacidade de recuperação após períodos de estresse hídrico, químico ou biológico, reforçando a importância da diversidade para a estabilidade e sustentabilidade dos sistemas de produção (Bueno *et al.*, 2018).

Adicionalmente, estudos recentes têm demonstrado que a estrutura da comunidade microbiana está intimamente relacionada às práticas de manejo adotadas. Sistemas convencionais que fazem uso intensivo de agroquímicos e realizam revolvimento frequente do solo tendem a reduzir a riqueza e a

abundância de espécies benéficas, favorecendo grupos oportunistas e, muitas vezes, menos eficientes do ponto de vista ecológico (Sobucki *et al.*, 2019). Em contrapartida, sistemas agroecológicos e orgânicos promovem o desenvolvimento de comunidades mais equilibradas, com maior proporção de microrganismos simbióticos, decompositores e antagonistas naturais (Santos *et al.*, 2020).

Estudos que analisaram a transição de sistemas de cultivo tradicionais para o orgânico observaram que, após cinco anos, os solos manejados sob cultivo mínimo apresentaram um aumento significativo no teor de carbono orgânico, contrapondo-se ao manejo convencional, no qual houve redução (Mihelič *et al.*, 2024). Para Mishra *et al.* (2024), o sistema orgânico proporciona condições mais favoráveis ao desenvolvimento microbiano, com incrementos de 116% no número de unidades formadoras de colônia (UFC) de bactérias, 18% para fungos e 145% para actinomicetos. Esse aumento populacional refletiu em maior acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, além de promover elevação na atividade enzimática, especialmente das enzimas desidrogenase e fosfatase.

Portanto, compreender os mecanismos que regem a diversidade microbiana e suas respostas ao manejo é essencial para o avanço da agricultura sustentável. A integração de estratégias que promovam a atividade biológica do solo, aliada ao monitoramento contínuo da microbiota, representa uma abordagem promissora para aumentar a eficiência dos sistemas agrícolas, conciliando produtividade e conservação ambiental (Souza *et al.*, 2019; Barbosa; Oliveira, 2022). A adoção de indicadores microbiológicos como ferramentas de diagnóstico também desponta como uma alternativa viável para avaliar o grau de sustentabilidade dos agroecossistemas (Silva *et al.*, 2021).

FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E QUALIDADE DO SOLO

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) constitui um processo ecológico determinante para a manutenção e recuperação da fertilidade do solo, integrando ciclos biogeoquímicos que suportam a produtividade dos agroecossistemas. Por meio da atividade de microrganismos diazotróficos simbiotes, associativos e de vida livre, o N_2 atmosférico é convertido em formas assimiláveis, diminuindo a necessidade de fontes minerais de nitrogênio e mitigando emissões e perdas associadas ao manejo convencional de fertilizantes. Essa contribuição tem ganho reconhecimento prático e econômico em larga escala, especialmente em sistemas de cultura como a soja no Brasil, onde a difusão de inoculantes e práticas de manejo associadas à FBN tem representado enorme economia e redução do uso de N sintético (Telles *et al.*, 2021).

No que diz respeito às propriedades químicas do solo, a fixação biológica contribui para o aumento do teor de nitrogênio total e influencia positivamente a dinâmica de outros nutrientes essenciais, como fósforo e enxofre, favorecendo interações nutricionais mais eficientes no sistema solo-planta. A incorporação de

biomassa de plantas fixadoras e o retorno de raízes e resíduos à fração orgânica do solo potencializam a formação de húmus e aumentam a capacidade de troca catiônica, favorecendo a retenção de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação (Forghieri *et al.*, 2025; Kebede, 2021).

Além da melhoria química, a FBN exerce efeitos positivos nas propriedades físicas do solo, pois o aumento da matéria orgânica e da atividade biológica decorrente de plantas fixadoras favorece a formação de agregados estáveis, melhora a porosidade do solo e, conseqüentemente, a infiltração. Essas mudanças estruturais são especialmente relevantes em solos tropicais de baixa matéria orgânica, onde a restauração da cobertura e dos ciclos de carbono e nitrogênio é fator crítico para a recuperação produtiva de áreas degradadas (Hungria; Nogueira, 2022; Koudahe *et al.*, 2022).

Além disso, a presença da FBN em manejos agrícolas altera a composição e a funcionalidade da microbiota edáfica, promovendo redes microbianas mais diversificadas e funcionais. Interações sinérgicas entre rizóbios, bactérias promotoras de crescimento (PGPB) e fungos saprófitos aumentam processos como mineralização de matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e solubilização de fósforo, além de estimular o desenvolvimento radicular e a saúde das plantas (Ahammed *et al.*, 2025). Práticas como coinoculação e formulações microbianas têm mostrado ganhos em rendimento e em atributos nutricionais das plantas, demonstrando o potencial integrador da FBN quando combinada com manejo técnico adequado (Barbosa *et al.*, 2023).

Todavia, a implementação da FBN em escalas produtivas exige atenção a fatores agrônômicos e edáficos que modulam sua eficiência. Condicionantes como acidez do solo, disponibilidade de fósforo, práticas de preparo e conservação do solo, doses de fertilizantes nitrogenados e compatibilidade entre tratamentos de semente e inoculantes são determinantes para o estabelecimento de associações eficazes. Neste contexto, a fixação biológica de nitrogênio quando integrada a práticas de manejo do solo e de fertilidade representa uma ferramenta central para aumentar a sustentabilidade, a resiliência e a produtividade dos agroecossistemas.

PRÁTICAS DE MANEJO SUSTENTÁVEL QUE FAVORECEM A FBN

A adoção de práticas agrícolas que visam a sustentabilidade tem se destacado como uma estratégia para otimizar o uso dos recursos naturais, permitindo a sua manutenção sem riscos de perdas futuras (Maciel *et al.*, 2023). Nesse contexto, o manejo voltado à conservação do solo e à promoção da atividade microbiana assume papel fundamental, uma vez que permite o estabelecimento de condições favoráveis para a associação entre culturas e microrganismos capazes de realizar fixação biológica de nitrogênio (Varela *et al.*, 2025).

Diversas técnicas e práticas, como a rotação de culturas, o uso de inoculantes microbianos de qualidade, a manutenção da cobertura vegetal e da matéria

orgânica do solo, contribuem de forma direta para melhorias nas taxas de eficiência da fixação biológica de nitrogênio, favorecendo o equilíbrio do sistema produtivo e uma melhor exploração do potencial da cultura cultivada (Silva *et al.*, 2021; Branco). A rotação e o consórcio de culturas possibilitam um incremento na diversidade de espécies vegetais em espaço e tempo, favorecendo uma ciclagem de nutrientes mais eficiente e uma dinâmica equilibrada da microbiota do solo (Prates Júnior, 2022).

A inclusão de espécies leguminosas nessas práticas permite uma boa manutenção no aporte natural de nitrogênio ao solo por meio da atividade de bactérias diazotróficas, beneficiando assim as culturas subsequentes. Além disso, o consórcio entre leguminosas e gramíneas, além de equilibrar a relação carbono/nitrogênio no solo, proporciona ambiente favorável ao desenvolvimento de bactérias fixadoras associativas, como *Azospirillum* e *Herbaspirillum* (Döbereiner; Baldani, 2024; Possimoser *et al.*, 2025).

A aplicação de inoculantes microbianos formulados com bactérias diazotróficas tornou-se uma das práticas agrícolas mais empregadas no que diz respeito à indução da FBN, já que estes produtos visam a introdução de cepas bacterianas mais eficientes para tal processo do que aquelas normalmente encontradas no meio (Nomura; Lazaretti, 2025). Diversas espécies como *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, *Burkholderia* e *Gluconacetobacter* têm sido estudadas e amplamente utilizadas para fabricação de inoculantes, com resultados positivos em diversas culturas (Simões *et al.*, 2018; Dias *et al.*, 2022). Além disso, técnicas de coinoculação, combinando diferentes microrganismos com propriedades simbióticas e associativas, têm mostrado efeitos sinérgicos, aumentando a absorção de nutrientes e o desenvolvimento das culturas (Dalolio *et al.*, 2018).

O manejo da matéria orgânica também exerce influência direta nos processos que modulam a FBN, pois a adição de resíduos vegetais, compostos orgânicos e a manutenção da cobertura do solo, especialmente em sistemas de plantio direto, promovem melhor aeração e estabilidade térmica do solo (Sobucki *et al.*, 2019). Estes fatores criam um ambiente equilibrado e com condições favoráveis ao desenvolvimento populacional da microbiota. Associada à manutenção da matéria orgânica, a redução nos processos de revolvimento do solo contribui para a preservação da sua estrutura física, permitindo o crescimento radicular e a oxigenação necessária aos microrganismos fixadores (Novak *et al.*, 2018; Chaves *et al.*, 2022).

O uso de bioestimulantes, como aminoácidos e extratos de algas, tem sido apontado e amplamente utilizado como uma prática promissora para intensificar a relação entre as bactérias diazotróficas e as culturas. Esses agentes bioativos atuam estimulando processos fisiológicos das plantas, permitindo que estas apresentem um bom aporte na produção de fotoassimilados e outros compostos que são utilizados pelas bactérias no processo de fixação (Chrispim; Delú Filho, 2025). Nesse sentido, a utilização de práticas sustentáveis forma uma base sólida para sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis, que visam à promoção da fixação biológica de nitrogênio, reduzindo custos com fertilizantes,

contribuindo para a conservação dos recursos naturais e para a manutenção da produtividade a longo prazo.

ESTUDOS DE FBN EM SOJA E MILHO NO BRASIL

Ao longo das últimas décadas, os programas de pesquisa e transferência de tecnologia foram determinantes para consolidar as práticas de inoculação e seleção de estirpes microbianas eficientes, que tornaram a fixação biológica de nitrogênio (FBN) uma tecnologia amplamente difundida e de elevada relevância econômica para a agricultura brasileira. Esse avanço é particularmente evidente na cultura da soja, na qual o estabelecimento de associações simbióticas altamente eficientes com rizóbios adaptados às condições edafoclimáticas do país permitiu reduzir de forma expressiva a dependência de fertilizantes químicos, contribuindo para o aumento da competitividade da soja brasileira no cenário internacional (Prado *et al.*, 2024).

Na soja brasileira, o êxito da FBN resulta de um conjunto de fatores integrados, incluindo a identificação e a seleção criteriosa de estirpes com elevada eficiência simbiótica, o desenvolvimento de formulações comerciais estáveis e protocolos de inoculação compatíveis com sistemas de produção em larga escala, bem como a avaliação contínua das interações entre genótipos, microrganismos e ambientes de cultivo. Esses avanços possibilitaram a substituição parcial ou total da adubação nitrogenada mineral pela FBN, resultando não apenas em redução significativa dos custos de produção, mas também em menor emissão de gases de efeito estufa associada à fabricação, transporte e aplicação de fertilizantes sintéticos (Barbosa *et al.*, 2021).

Sob a perspectiva agrônômica, econômica e ambiental, a contribuição da FBN na produção de soja tem sido amplamente quantificada, com estimativas que indicam uma economia anual superior a US\$ 17 bilhões, decorrente principalmente da eliminação do uso de fertilizantes nitrogenados minerais (Hungria; Nogueira, 2022). Além do impacto econômico direto, a FBN promove importantes serviços ecossistêmicos, como a melhoria da ciclagem de nutrientes no sistema solo-planta, a redução de perdas de nitrogênio por lixiviação e volatilização, e o fortalecimento de sistemas de rotação e sucessão de culturas, os quais contribuem para maior resiliência e sustentabilidade dos sistemas produtivos (Telles *et al.*, 2021).

No caso do milho, embora se trate de uma gramínea que não estabelece simbiose nodular típica das leguminosas, estudos demonstram que bactérias diazotróficas associativas, como *Azospirillum* spp. E *Herbaspirillum* spp. Podem contribuir de forma mensurável para o suprimento de nitrogênio às plantas. Além da fixação de N₂ atmosférico, esses microrganismos exercem efeitos indiretos relevantes, atuando como promotores de crescimento vegetal por meio da produção de fitormônios, do estímulo ao desenvolvimento do sistema radicular e do aumento da eficiência de absorção de água e nutrientes, o que pode resultar em maior eficiência do uso do nitrogênio aplicado via fertilização mineral (Fukami *et al.*, 2018).

Resultados de experimentos conduzidos em condições de campo e de laboratório indicam que a contribuição da FBN em milho é mais variável e, em geral, quantitativamente inferior à observada na soja, sendo fortemente influenciada por fatores como genótipo da planta, disponibilidade de nitrogênio no solo, condições ambientais e manejo agrônomo. Ainda assim, evidências acumuladas sugerem que a FBN pode desempenhar papel complementar estratégico nos sistemas de produção de milho, contribuindo em média com 30% da demanda nitrogenada da cultura, o que permite reduzir parcialmente as doses de N mineral (Galindo *et al.*, 2024; Marques *et al.*, 2024).

Nesse contexto, observa-se crescente interesse no desenvolvimento e na adoção de produtos microbianos, incluindo inoculantes à base de bactérias diazotróficas e formulações combinadas com bioestimulantes, bem como no aprofundamento do conhecimento sobre a microbiota da rizosfera e sua interação com o milho. O avanço dessas pesquisas é fundamental para ampliar a consistência dos resultados em condições comerciais, fortalecer o papel da FBN como componente do manejo integrado da nutrição nitrogenada e contribuir para a construção de sistemas agrícolas mais eficientes, sustentáveis e alinhados aos princípios da agricultura de baixo carbono.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fixação biológica de nitrogênio apresenta-se como um importante componente para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis, especialmente diante da necessidade de reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados minerais. A atuação dos microrganismos diazotróficos contribui para a disponibilidade de nitrogênio às plantas e está associada à melhoria das condições químicas, físicas e biológicas do solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a manutenção da fertilidade.

A eficiência desse processo está diretamente relacionada às condições do ambiente e às práticas de manejo adotadas. Rotação e consórcio de culturas, manutenção da cobertura vegetal e da matéria orgânica, redução do revolvimento do solo e utilização adequada de inoculantes favorecem a atividade e a diversidade microbiana. Dessa forma, a FBN deve ser compreendida de maneira integrada ao manejo do sistema produtivo, considerando as interações entre solo, plantas e microrganismos.

No contexto brasileiro, a cultura da soja demonstra a relevância agrônoma, econômica e ambiental da FBN, uma vez que a associação com rizóbios permite reduzir de forma expressiva a necessidade de fertilizantes nitrogenados minerais. No milho, embora a contribuição seja mais variável e complementar, bactérias diazotróficas associativas podem favorecer o suprimento de nitrogênio, o desenvolvimento radicular e a eficiência de absorção de água e nutrientes, ampliando as possibilidades de utilização desses microrganismos no manejo da cultura.

Assim, a integração entre diversidade microbiana, fixação biológica de nitrogênio e práticas conservacionistas constitui uma alternativa relevante para conciliar produtividade e conservação dos recursos naturais. O avanço das pesquisas e o aperfeiçoamento das tecnologias de inoculação podem ampliar a estabilidade das respostas em diferentes condições de cultivo, fortalecendo a participação da FBN em sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e alinhados aos princípios da agricultura sustentável e de baixo carbono.

REFERÊNCIAS

- AHAMMED, I.; MONDAL, R.; NESA, J.; MANDAL, A. K.; SADAT, A. Understanding the role of soil microbiota and its interplay with environment to ensure sustainable development for the future generations. **Applied Soil Ecology**, v. 212, 2025, art. 106217.
- BALD, D. R.; RANGEL, C. P.; VARGAS, A.; GIRÃO, K. T.; PASSAGLIA, L. M. P. Microbiota do solo: a diversidade invisível e a sua importância. **Bio Diverso**, v. 1, n. 1, p. 101-131, 2021.
- BARBOSA, H. M.; ALVAREZ, R. C. F.; LIMA, S. F.; CORDEIRO, M. A. S.; ZANELLA, M. S.; BERNARDO, V. F. Bradyrhizobium and Azospirillum co-inoculation associated with cobalt and molybdenum application in the soybean crop. **Ciência Rural**, v. 53, n. 7, e20210871, 2023.
- BARBOSA, J. Z.; HUNGRIA, M.; SENA, J. V. S.; POGGERE, G.; REIS, A. R.; CORRÊA, R. S. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with Azospirillum brasilense and Bradyrhizobium spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 163, 2021, art. 103913.
- BARBOSA, T. C. S.; OLIVEIRA, V. P. V. Indicadores químicos e biológicos de qualidade do solo utilizados no monitoramento da degradação em ambientes semiáridos: análise do estado da arte. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 17403-17423, 2022.
- BRANCO, J. S.; PRATES JÚNIOR, P. Fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável de forragem. **Revista de Educação Tecnológica e Científica**, v. 3, n. 1, p. 101-114, 2022.
- BUENO, P. A. A.; OLIVEIRA, V. M. T.; GUALDI, B. L.; SILVEIRA, P. H. N.; PEREIRA, R. G.; FREITAS, C. E. S.; BUENO, R. O.; SEKINE, E. S.; SCHWARCZ, K. D. Indicadores microbiológicos de qualidade do solo em recuperação de um sistema agroflorestal. **Acta Brasiliensis**, v. 2, n. 2, p. 40-44, 2018.
- ÇAKMAKÇI, R.; ÇAKMAKÇI, S.; ÇAKMAKÇI, M. F. Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. **Turkish Journal of Biology**, v. 49, n. 5, p. 550-584, 2025.

CHATAUT, G.; BHATTA, B.; JOSHI, D.; SUBEDI, K.; KAFLE, K. Greenhouse gas emissions from agricultural soil: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 11, 2023, art. 100533.

CHAVES, J. S.; SILVA, L. S.; MATOS, S. M.; PEREIRA, H. R.; MELO, J. J. S.; SILVA, A. F.; SANTOS, E. J.; SILVA, R. P.; BRITO, W. A.; LEITE, J. L. Parâmetros microbiológicos do solo em sistema de produção consorciado sob manejo orgânico. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. 01-09, 2022.

CHRISPIM, J. G.; DELÚ FILHO, N. Uso de fertilizante e bioestimulante foliar em diferentes doses na cultura de milho. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, v. 7, n. 1, p. 47-70, 2025.

DALOLIO, R. S.; BORIN, E.; CRUZ, R. M. S.; ALBERTON, O. Co-inoculação de soja com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 7, n. 2, p. 01-07, 2018.

DIAS, B. P.; DIAS, E. R.; OLIVEIRA, R. A. P.; GUIMARÃES, C. R. R. Avaliação do uso do inoculante *Bradyrhizobium japonicum* na cultura da soja (*Glycine max*) em Colméia-TO. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, p. 01-11, 2022.

DÖBEREINER, J.; BALDANI, J. I. Bases científicas para uma agricultura biológica. **Ciência & Cultura**, v. 76, n. 4, p. 01-16, 2024.

FERREIRA, J. S.; SANTOS, R. K. A.; LIMA, M.C.D.; NASCIMENTO, M. S.; ÁVILA, J.S.; FILHO, R. L. S. A.; BALDANI, V. L. D. Inoculação e reinoculação de *Herbaspirillum seropedica* em duas variedades de arroz irrigado. **Research, Society and Development**, v. 10, n.16, e458101623873, 2021

FORGHIERI, G.; GHEINI, E.; TORRIGINO, F.; MARTINO, R. D.; LUCARINI, F.; STAEDLER, D.; BIASI, P.; SIGNORETTO, M. Enabling biological nitrogen fixation in agriculture: An eco-industrial perspective. **Food Bioscience**, v. 73, 2025, art. 107734.

FUKAMI, J.; CERZINI, P.; HUNGRIA, M. *Azospirillum*: benefits that go far beyond biological nitrogen fixation. **AMB Express**, v. 8, p. 73, 2018.

GALINDO, F. S.; PAGLIARI, P. H.; SILVA, E. C.; LIMA, B. H.; FERNANDES, G. C.; THIENGO, C. C.; BERNARDES, J. V. S.; JALAL, A.; OLIVEIRA, C. E. S.; VILELA, L. S.; FURLANI JUNIOR, E.; NOGUEIRA, T. A. R.; NASCIMENTO, V.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; LAVRES, J. Impact of nitrogen fertilizer sustainability on corn crop yield: the role of beneficial microbial inoculation interactions. **BMC Plant Biology**, v. 24, n. 268, 2024.

GARCIA, A. P. G.; LIMA, C. S.; SCHNEIDER, G.; SANTOS, W. S.; INOUE, M. H. Endophytic microorganisms as biocontrol agents: an alternative for the sustainable agricultural production system. **Revista Aracê**, v. 6, n. 3, p. 4275-4288, 2024.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica do nitrogênio. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 141-162.

- KEBEDE, E. Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 2021
- KOUDAHE, K.; ALLEN, S.; DJAMAN, K. Critical Review of the Impact of Cover Crops on Soil Properties. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 6, 2022.
- JESUS, C. M.; SILVA, J. S.; PAIVA, T. S. S.; SOUZA, F. G.; MELO, D. D.; SANTOS, R. K. A. **Nitrogen fertilization and rhizobium strains efficient in the development and productivity of cowpea**. HOLOS, v. 39, n. 7, p. 01-25, 2023.
- LOPES, M. J. S.; SANTIAGO, B. S.; SILVA, I. N. B.; GURGEL, E. S. C. Biotecnologia microbiana: inoculação, mecanismos de ação e benefícios às plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. 01-13, 2021.
- LOUREIRO, T. C.; FERREIRA, J. S.; SANTOS, R. K. A.; LIMA, M. C. D.; ÁVILA, J.S.; LADEIA, C. A.; SANTOS, J. S. Associação de ureia e bactérias diazotróficas incrementa o crescimento no milho. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 7, p.73687-73699, 2021.
- MACIEL, M. D. A.; TROIAN, A.; BREITENBACH, R. **Inovação e sustentabilidade: as práticas da agricultura familiar agroecológica em Santana do Livramento/RS**. Grifos, v. 32, n. 60, p. 01-23, 2023.
- MARQUES, D. M.; MAGALHÃES, P. C.; MARRIEL, I. E.; SILVA, A. B.; ALMEIDA, L. G.; SOUZA, T. C. Azospirillum brasilense inoculation improves the morphophysiological aspects of maize in soils with high and low nitrogen contents. **Brazilian Journal of Maize and Sorghum**, v. 23, e1356, p. 01-14, 2024.
- MENEGAT, S.; LEDO, A.; TIRADO, R. Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. **Scientific Reports**, v. 12, 2022, art. 14490.
- MIHELIČ, R.; PINTARIČ, S.; ELER, K.; SUHADOLC, M. Effects of transitioning from conventional to organic farming on soil organic carbon and microbial community: a comparison of long-term non-inversion minimum tillage and conventional tillage. **Biology and Fertility of Soils**, v. 60, n. 1, p. 341-355, 2024.
- MISHRA, A. K.; MAURYA, P. K.; SHARMA, S. Impact of different farming scenarios on key soil sustainability indicators driving soil carbon and system productivity of rice-based cropping systems. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, n. 1, p. 01-15, 2024.
- NOMURA, R. F.; LAZARETTI, N. S. Uso de inoculantes biológicos no desenvolvimento inicial de plantas de feijão preto. **Revista Cultivando o Saber**, v. 1, n. 1, p. 127-137, 2025.
- NOVAK, E.; CARVALHO, L. A.; SANTIAGO, E. F.; BRUMATTI, A. V.; SANTOS, L. L.; SALES, L. C. Variação temporal dos atributos microbiológicos do solo sob diferentes usos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 603-611, 2018.

PASCUTTI, M. C. D.; SILVESTRE, R. S. F.; ORTIZ, T. A. O papel dos microrganismos na agricultura sustentável: uma revisão. **Revista Desarrollo Local Sostenible**, v. 17, n. 52, p. 01-18, 2024.

PASCUTTI, M. C. D.; SILVESTRE, R. S. F.; ORTIZ, T. A. The role of microorganisms in sustainable agriculture: a review. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, v.17, n.52, p. 01-18, 2024.

PEREIRA, A. E.; SILVA JÚNIOR, O. L.; SCHIMIDT FILHO, E.; GASPAROTTO, F.; PACCOLA, E. A. S. Uma revisão sistemática dos indicadores microbiológicos para avaliar a qualidade do solo agrícola. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 5, p. 01-19, 2024.

POSSIMOSER, D. S.; SILIRIO, D. S.; SILVA, F. C. Rotação de culturas com milho na Agricultura Familiar: Benefícios para a fertilidade do solo e controle de pragas. **Revista Nativa Americana de Ciências, Tecnologia & Inovação**, v. 8, n. 1, p. 50-57, 2025.

PRADHAN, N. C.; GAVHANE, K. P.; BHALEKAR, D. G.; DHARMENDER.KIRAN, P. R. Sustainable agriculture fundamentals. In: SARKAR, T.; SMAOUI, S. Health, Nutrition and Sustainability: Exploring Unconventional Food Sources. 1. ed. Cambridge: Academic Press, 2025, p. 609-626.

PRADO, A. M.; BARBOSA, J. Z.; OLIVEIRA, A. B.; NOGUEIRA, M A. Benefits of soybean co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: Large-scale validation with farmers in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 155, n. 4, E127112, 2024.

PRATA, L. R.; FERREIRA, J. S.; SANTOS, R. K. A.; RAMOS, P. A. S.; CERQUEIRA, D. C.; RODRIGUES, V. A. Interação de níveis de nitrogênio e potássio no crescimento inicial de eucalipto. **Rev. Agro. Amb.**, v. 18, e13426, 2025 - e-ISSN 2176-9168, p. 1 de 12

RAMOS, R. F.; SOBUCKI, L.; ROHRIG, B.; LUDWIG, J.; DAROIT, D. J. Diversidade funcional de bactérias isoladas de solos rizosféricos e não rizosféricos em cultura de milho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 3, p. 417-427, 2018.

REMPELOS, L.; BARAŃSKI, M.; SUFAR, E. K.; GILROY, J.; SHOTTON, P.; LEIFERT, H.; ŚREDNICKA-TOBER, D.; HASANALIYEVA, G.; ROSA, E. A. S.; HAJLSLOVA, J.; SCHULZOVA, V.; CAKMAK, I.; OZTURK, L.; BRANDT, K.; SEAL, C.; WANG, J.; SCHMIDT, C.; LEIFERT, C. Effect of climatic conditions, and agronomic practices used in organic and conventional crop production on yield and nutritional composition parameters in potato, cabbage, lettuce and onion; results from the long-term NFSC-trials. **Agronomy**, v. 13, n. 5, e1225, 2023.

REZENDE, C. C.; SILVA, M. A.; FRASCA, L. L. M.; FARIA, D. R.; FILIPPI, M. C. C.; LANNA, A. C.; NASCENTE, A. S. Micro-organismos multifuncionais: utilização na agricultura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. 01-15, 2021.

SANTOS, R. K. A.; FERREIRA, J. S.; PAULA, R. C.; RODRIGUES, V. A.; da SILVA, V. A. M.; SANTOS, J. da S. Plant growth-promoting bacteria associated with nitrogen fertilization in *Eucalyptus urophylla* increase growth. **HOLOS**, v. 37, n. 2, e9828, 2021

SANTOS, T. E. B.; SOUZA, A. G. V.; SILVA, K. D.; BUENO, L. L.; BESERRA, G. A. Agricultura orgânica e a microbiota do solo. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, p. 95-102, 2020.

SANTOS, R. K. A.; SCIPIONI, C. A.; MACEDO, T. H. J.; NASCIMENTO, C. C.; SANTOS, J. S.; FERREIRA, J. S. Seleção de bactérias promotoras de crescimento em eucalipto em condições de casa de vegetação. **ACSA**, v.15, n. 3, p.224-227, 2019.

SILVA, C. J.; BALDANI, J. I.; ROUWS, J. R. C.; SCHWAB, S.; DELGADO, A. R. S. Agrobiologia: avaliação do potencial de novas bactérias fixadoras de nitrogênio e/ou promotoras do crescimento vegetal para inoculação na cana-de-açúcar. *Caderno Pedagógico*, v. 22, n. 11, p. 01-20, 2025.

SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R.; REIS, V. M.; PEREIRA, W.; LIMA, J. A. Aplicação de bactérias diazotróficas via sistema de irrigação para fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar. **Revista Energia na Agricultura**, v. 33, n. 1, p. 45-51, 2018.

SLAMA, H. B.; CHENARI BOUKET, A.; ALENEZI, F. N.; LUPTAKOVA, L.; BARANOV, O.; AHADI, R.; BELBAHRI, L. Impacts of salt stress on the rhizosphere and endophytic bacterial role in plant salt alleviation. **International Journal of Plant Biology**, v.14, n.2, p.361-376, 2023.

SOBUCKI, L.; RAMOS, R. F.; BELLÉ, C.; ANTONIOLLI, Z. I. Manejo e qualidade biológica do solo: uma análise. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 3, n. 1, p. 01-04, 2019.

SOUZA, E. D.; SILVA, C. R. M.; PINTO, F. A.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; PACHECO, L. P.; TERRA, F. D.; LAROCA, J. V. S. **Soil quality indicators after conversion of “murundu” fields into no-tillage cropping in the Brazilian Cerrado**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 54, n. 1, p. 01-09, 2019.

TELLES, T.S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology e Innovation**, v. 31, 2023, art. 103158.

TOMAZELLI, D.; GÓSS-SOUZA, D.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; KLAUBERG-FILHO, O. **Biologia do Solo: Conceitos e aplicações nas ciências agrárias**. São Paulo: Freitas Bastos, 2024. 194 p.

VARELA, C. G. B.; TÁVORA, R.; FRANCO, G. M. S.; MOURA, A. C.; SOARES, I. A. Práticas sustentáveis de manejo do solo no século XXI: Revisão sistemática de evidências sobre qualidade do solo (2000–2023). **Revista Aracê**, v. 7, n. 8, p. 01-25, 2025.

ZANETTI, W. A. L.; SILVÉRIO, A. L. S.; COSMO, B. M. N.; NETO, M. M.; CATANEO, P. F.; PUTTI, F. F.; ROSA, W. B.; DANILUSSI, M. T. Y. Desenvolvimento agrícola com a introdução dos bioinsumos. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v.7, 2023.

PANDEY, K.; SAHARAN, B. S. Soil microbiomes: a promising strategy for boosting crop yield and advancing sustainable agriculture. **Discover Agriculture**, v. 3, n. 54, 2025.

ROSSI, P. H. S.; OSHIIWA, M.; BRUNATTI, A. C. S.; GIANNONI, J. A. Biofertilizantes e biopesticidas: avanços na biotecnologia para uma produção sustentável de alimentos. **Brazilian Journal of Development**, v.11, n.7, p.01-12, 2025

ZHANG, X.; ZHANG, L.; LIU, J.; SHEN, Z.; LIU, Z. X.; GU, H.; HU, X. J.; YU, Z.; LI, Y.; JIN, J. Biofertilizers enhance soil fertility and crop yields through microbial community modulation. **Agronomy**, v. 15, n. 7, 2025

MORETTI, L. G.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEITE, M. F. A.; MOMOSSO, L.; BOSSOLANI, J. W.; COSTA, O. Y. A.; HUNGRIA, M.; KURAMAE, E. E. Diverse bacterial consortia: key drivers of rhizosoil fertility modulating microbiome functions, plant physiology, nutrition, and soybean grain yield. **Environmental Microbiome**, v. 19, n. 50, 2024.