SAMANTHA NAOMI MONFREDINI ALENCAR

AVALIAÇÃO DE *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* COMO BIOINSUMO NA NUTRIÇÃO DE FEIJOEIRO

LAVRAS – MG

2026

SAMANTHA NAOMI MONFREDINI ALENCAR

AVALIAÇÃO DE *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* COMO BIOINSUMO NA NUTRIÇÃO DE FEIJOEIRO

Tese de Doutorado apresentado à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola, área de concentração em Microbiologia Agrícola, para obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Whasley Ferreira Duarte
Orientador

Dr. Danilo José Machado de Abreu
Coorientador

LAVRAS – MG

2026

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Alencar, Samantha Naomi Monfredini.
Avaliação de Pseudoallinostoc soli como bioinsumo na nutrição de feijoeiro / Samantha Naomi Monfredini Alencar. - 2026.
94 p. : il.

Orientador: Whasley Ferreira Duarte
Coorientador: Danilo José Machado de Abreu

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Biofertilizantes. 2. Cianobactéria. 3. Fixação de nitrogênio. I. Duarte, Whasley Ferreira. II. Abreu, Danilo José Machado de. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

SAMANTHA NAOMI MONFREDINI ALENCAR

AVALIAÇÃO DE *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* COMO BIOINSUMO NA NUTRIÇÃO DE FEIJOEIRO

EVALUATION OF *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* AS A BIOINPUT IN COMMON BEAN NUTRITION

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola, área de concentração em Microbiologia Agrícola, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 30 de março de 2026.

Dr. Whasley Ferreira Duarte	UFLA
Dr. Carlos Godinho de Abreu	UFLA
Dr. Danilo José Machado de Abreu	UFLA
Dr. Félix Gonçalves de Siqueira	EMBRAPA
Dra. Tamara Leite dos Santos	UFLA

gov.br Documento assinado digitalmente
WHASLEY FERREIRA DUARTE
Data: 24/06/2026 16:52:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Whasley Ferreira Duarte
Orientador

Dr. Danilo José Machado de Abreu
Coorientador

LAVRAS – MG
2026

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar sabedoria e força para alcançar esta conquista.

Ao Rafael, meu esposo, por me incentivar e me apoiar em cada momento, comemorar comigo cada conquista e ser um grande companheiro na minha vida.

Aos meus pais, Shirlei e Vilmar, por acreditarem sempre na minha capacidade e torcerem pelas minhas realizações.

A toda a minha família, que, mesmo distante, sempre me apoiou nesta jornada.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade concedida, e ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola (PPGMA), pelo acolhimento.

Ao Professor Dr. Whasley Ferreira Duarte, por toda a orientação, profissionalismo, ética, disponibilidade e conhecimentos transmitidos ao longo desses anos. Agradeço o acolhimento como aluna e por cada ensinamento e conselho.

A todos os professores do PPGMA, que contribuíram significativamente para a minha formação acadêmica e científica, tanto pela transmissão de conhecimentos quanto pelo apoio técnico e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À toda a equipe do laboratório de Ecologia Microbiana e Bioinformática, pelo suporte na realização das análises moleculares. Agradeço a disponibilidade, paciência e disposição em compartilhar conhecimentos.

À equipe do laboratório LBM – Laboratório de Bioprospecção de Microrganismos, pela convivência diária, troca de conhecimentos, colaboração nas atividades experimentais e apoio em todos os momentos desta jornada. Agradeço pelo companheirismo, pelas discussões científicas, pela ajuda nos desafios do dia a dia e pelos momentos de descontração, que tornaram essa caminhada mais leve e enriquecedora. Em especial, agradeço à minha amiga Francielle, que me acompanhou em toda a trajetória e foi meu porto seguro, minha alegria diária e minha maior incentivadora. Mostrou-me o que é uma amizade verdadeira, que levarei para o resto da vida.

Aos amigos do PPGMA e do LBM que construí ao longo desses anos, que me ensinaram, me deram forças, me apoiaram e me aconselharam. Agradeço por cada momento que passamos juntos, de descontração e de aprendizagem. Sem isso, essa jornada não teria sido a mesma.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001”.

RESUMO

Cianobactérias são microrganismos procariontes, autotróficos e amplamente adaptáveis, com grande diversidade morfológica e metabólica. Sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, em especial os *Nostocales*, devido à presença de heterócitos, permite sua sobrevivência em ambientes adversos e as torna promissoras para aplicação biotecnológica em sistemas agrícolas. Além disso, produzem compostos bioativos, como exopolissacarídeos (EPS), antioxidantes e enzimas, que têm sido explorados na promoção do crescimento vegetal e na melhoria da qualidade do solo. Nesse contexto, o uso de biomassa de cianobactérias como biofertilizante e bioestimulante surge como alternativa sustentável, contribuindo para reduzir a dependência de fertilizantes químicos. O presente estudo teve como objetivos realizar a caracterização fisiológica comparativa de cinco linhagens de cianobactérias pertencentes à ordem *Nostocales*, visando à seleção da linhagem com maior potencial biotecnológico, e em seguida avaliar o efeito biofertilizante da linhagem selecionada no cultivo do feijão preto Ouro Negro (Honduras 35). Na primeira etapa, foram analisados o crescimento da biomassa (absorbância e peso seco), a concentração de clorofila *a*, produção de EPS e a atividade nitrogenase. Na segunda etapa, na etapa experimental em casa de vegetação, a biomassa da linhagem selecionada foi cultivada em meio $BG11_0$ sob condições controladas e aplicada ao feijoeiro a cada sete dias, após o surgimento da primeira trifoliada. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (NF, F e N) e oito repetições. Foram avaliados parâmetros biométricos, pigmentos foliares, produtividade e atributos microbiológicos do solo. A linhagem UFLA 37 apresentou os maiores valores de clorofila *a* (3,88 $\mu g.mL^{-1}$) e absorbância média (A_{680} = 3,54), indicando maior eficiência fotossintética e crescimento superior em relação às demais linhagens. Também apresentou elevada atividade nitrogenase (94,84±76,16 nmol $N_2.g^{-1}$ $ms.h^{-1}$) e produção consistente de EPS (10 mg a partir de 220 mg de biomassa), sendo selecionada com base no conjunto dos parâmetros fisiológicos avaliados. A avaliação agronômica evidenciou que a aplicação da biomassa, especialmente quando associada ao fertilizante comercial, promoveu maior crescimento vegetativo do feijoeiro, refletido em incrementos na altura das plantas (14,44 cm), diâmetro do caule (4,25 cm), número de folhas (6,25) e comprimento radicular (38,33±19,14 cm), além de maior população microbiana do solo ($9,80\times10^5$ UFC). Em relação à produtividade, a associação entre biomassa e fertilizante comercial favoreceu a formação de vagens (11,80), enquanto o fertilizante comercial de forma isolada contribuiu de maneira mais eficiente para o enchimento dos grãos (15,31 g), evidenciando efeito complementar entre os tratamentos. Dessa forma, os resultados

demonstram que a seleção baseada em caracterização fisiológica constitui estratégia eficiente para a identificação de linhagens com uso promissor como biofertilizante. Além disso, a aplicação da biomassa da linhagem escolhida apresenta potencial para uso como biofertilizante em sistemas agrícolas, especialmente quando integrada à fertilização mineral, contribuindo para o crescimento vegetal, a produtividade e a qualidade biológica do solo, reforçando sua aplicação como ferramenta biotecnológica voltada à agricultura sustentável.

Palavras-chave: biofertilizantes; cianobactéria; fixação de nitrogênio.

ABSTRACT

Cyanobacteria are prokaryotic, autotrophic, and highly adaptable microorganisms with considerable morphological and metabolic diversity. Their ability to fix atmospheric nitrogen, particularly among members of the order Nostocales due to the presence of heterocytes, enables their survival under adverse environmental conditions and makes them promising candidates for biotechnological applications in agricultural systems. In addition, cyanobacteria produce bioactive compounds such as exopolysaccharides (EPS), antioxidants, and enzymes, which have been explored for promoting plant growth and improving soil quality. In this context, the use of cyanobacterial biomass as a biofertilizer and biostimulant has emerged as a sustainable alternative, contributing to a reduced dependence on chemical fertilizers. The objectives of this study were to perform a comparative physiological characterization of five cyanobacterial strains belonging to the order Nostocales in order to select the strain with the greatest biotechnological potential and subsequently evaluate the biofertilizer effect of the selected strain on the cultivation of Ouro Negro black bean (Honduras 35). In the first stage, biomass growth (absorbance and dry weight), chlorophyll *a* concentration, EPS production, and nitrogenase activity were evaluated. In the second stage, under greenhouse conditions, the biomass of the selected strain was cultivated in BG110 medium under controlled conditions and applied to bean plants every seven days after the emergence of the first trifoliate leaf. The experiment was conducted in a completely randomized design with three treatments (NF, F, and N) and eight replicates. Biometric parameters, leaf pigments, yield, and soil microbiological attributes were evaluated. The UFLA 37 strain exhibited the highest chlorophyll *a* concentration (3.88 μg mL^{-1}) and mean absorbance (A680 = 3.54), indicating greater photosynthetic efficiency and superior growth compared with the other strains. It also showed high nitrogenase activity (94.84 ± 76.16 nmol N_2 g^{-1} DW h^{-1}) and consistent EPS production (10 mg from 220 mg of biomass), being selected based on the overall physiological parameters evaluated. Agronomic assessment demonstrated that biomass application, particularly when combined with commercial fertilizer, promoted greater vegetative growth of bean plants, reflected by increases in plant height (14.44 cm), stem diameter (4.25 cm), number of leaves (6.25), and root length (38.33 ± 19.14 cm), as well as a higher soil microbial population (9.80×10^5 CFU). Regarding yield, the combination of biomass and commercial fertilizer favored pod formation (11.80), whereas commercial fertilizer applied alone contributed more efficiently to grain filling (15.31 g), indicating a complementary effect between treatments. These results demonstrate that selection based on physiological characterization is an efficient strategy for identifying

strains with promising potential as biofertilizers. Furthermore, the application of biomass from the selected strain shows potential for use as a biofertilizer in agricultural systems, particularly when integrated with mineral fertilization, contributing to plant growth, productivity, and soil biological quality, thereby reinforcing its application as a biotechnological tool for sustainable agriculture.

Palavras-chave: biofertilizers; cyanobacteria; nitrogen fixation.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente trabalho avaliou o potencial da cianobactéria *Pseudoallinostoc soli* como bioinsumo para a nutrição do feijoeiro Ouro Negro, visando contribuir para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis à fertilização convencional. Os resultados demonstraram que a biomassa microbiana apresentou características fisiológicas relevantes para uso agrícola, incluindo elevada atividade nitrogenase, produção de exopolissacarídeos e capacidade de promover o crescimento vegetal. Em condições de casa de vegetação, a aplicação da biomassa associada à adubação comercial favoreceu o desenvolvimento vegetativo das plantas, resultando em incrementos na altura, diâmetro do caule, comprimento radicular e número de folhas, além de contribuir para a formação de vagens. Os impactos tecnológicos decorrem da geração de conhecimento científico voltado ao desenvolvimento de biofertilizantes à base de cianobactérias, ampliando as possibilidades de inovação no setor agrícola e fortalecendo estratégias de manejo integrado de nutrientes. Sob a perspectiva ambiental, os resultados evidenciam o potencial de utilização de microrganismos capazes de fixar nitrogênio atmosférico, reduzindo parcialmente a dependência de fertilizantes sintéticos e contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis, com menor impacto sobre os recursos naturais. Os impactos econômicos são observados de forma potencial, uma vez que o uso de bioinsumos pode contribuir para a otimização da eficiência da fertilização e para a redução dos custos de produção em sistemas agrícolas, especialmente em pequenas e médias propriedades rurais. Os impactos sociais estão relacionados à disseminação de tecnologias sustentáveis que favorecem a produção de alimentos, fortalecem a segurança alimentar e incentivam a adoção de práticas agrícolas ambientalmente responsáveis. O estudo foi desenvolvido na Universidade Federal de Lavras, podendo beneficiar futuramente produtores rurais, instituições de pesquisa, empresas do setor de bioinsumos e programas voltados à agricultura sustentável. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial biotecnológico da *Pseudoallinostoc soli* para aplicação na agricultura, contribuindo para o avanço científico, tecnológico, econômico e ambiental alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas.

IMPACT INDICATORS

This study evaluated the potential of the cyanobacterium Pseudoallinostoc soli as a bioinput for the nutrition of Ouro Negro common bean, aiming to contribute to the development of sustainable alternatives to conventional fertilization. The results demonstrated that the microbial biomass exhibited relevant physiological characteristics for agricultural use, including high nitrogenase activity, exopolysaccharide production, and the ability to promote plant growth. Under greenhouse conditions, the application of biomass associated with commercial fertilizer enhanced plant vegetative development, resulting in increases in plant height, stem diameter, root length, and number of leaves, as well as contributing to pod formation. The technological impacts arise from the generation of scientific knowledge aimed at the development of cyanobacteria-based biofertilizers, expanding opportunities for innovation in the agricultural sector and strengthening integrated nutrient management strategies. From an environmental perspective, the results highlight the potential use of microorganisms capable of fixing atmospheric nitrogen, partially reducing dependence on synthetic fertilizers and contributing to more sustainable agricultural practices with lower impacts on natural resources. The economic impacts are considered potential, since the use of bioinputs may contribute to optimizing fertilization efficiency and reducing production costs in agricultural systems, particularly in small and medium-sized farms. Social impacts are related to the dissemination of sustainable technologies that support food production, strengthen food security, and encourage the adoption of environmentally responsible agricultural practices. The study was conducted at the Federal University of Lavras and may potentially benefit farmers, research institutions, bioinput companies, and programs focused on sustainable agriculture. Therefore, the results reinforce the biotechnological potential of Pseudoallinostoc soli for agricultural applications, contributing to scientific, technological, economic, and environmental advancement in alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características agronômicas do feijoeiro Ouro negro (Honduras 35) 25

Tabela 2 Composição química do solo inicial utilizado para o cultivo 46

Tabela 3 Valores de nitrogênio fixado de cada linhagem observada através da análise de GC em nmol $N_2.g^{-1}$ $ms.h^{-1}$ 56

Tabela 4 Índice de Solubilização (IS) de fosfato da linhagem UFLA 37 em meio sólido 61

Tabela 5 Peso fresco médio (g) das folhas, raiz e caule e comprimento da maior raiz (cm) das plantas coletadas com DAS 60 72

Tabela 6 Umidade (%) das folhas e dos caules no DAS 60 74

Tabela 7 Produtividade das plantas ao final do experimento 75

Tabela 8 Unidades Formadoras de Colônias (UFC) do solo 79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Equação da clorofila a	43
Figura 2	Cálculo da concentração de etileno em nanomols por grama de massa por hora de incubação	44
Figura 3	Cálculo da concentração de N fixado em nmol $N_2.g^{-1}$ $ms.h^{-1}$	45
Figura 4	Absorbância média de cada linhagem observada após 15 dias de cultivo .	52
Figura 5	Peso seco médio da biomassa (mg) produzida pelas linhagens de cianobactérias após 15 dias de cultivo em 100 mL de meio de cultura	53
Figura 6	Concentração de clorofila a (µg.mL-1) de cada linhagem observada após 15 dias de cultivo	54
Figura 7	Peso seco de EPS (mg) extraído a partir do peso seco de biomassa (mg) das linhagens UFLA 11, UFLA 37 e UFLA 19	58
Figura 8	Variação do pH do solo observado a cada sete dias ao longo do experimento	62
Figura 9	Altura (cm) das plantas submetidas aos tratamentos NF, F e N, medidas a cada sete dias ao longo do ciclo da cultura	64
Figura 10	Diâmetro médio do caule (cm) das plantas submetidas aos tratamentos NF, F e N, medidas a cada sete dias ao longo do ciclo da cultura	66
Figura 11	Número de folhas das plantas submetidas aos tratamentos NF, F e N, contabilizadas a cada sete dias ao longo do ciclo da cultura	67
Figura 12	Comparação visual do porte e do desenvolvimento da parte aérea de plantas de feijão cultivadas sob diferentes tratamentos	70
Figura 13	Sistema radicular das plantas de feijão coletadas ao 59 DAS, submetidas aos tratamentos NF, F e N	71
Figura 14	Valores de clorofila a, b e carotenoides das folhas do feijoeiro coletados no 17, 51 e 74 DAS	76
Figura 15	Crescimento de cianobactérias em meio BG-110 obtido a partir do plaqueamento de amostras de raízes de plantas dos tratamentos NF (A) e N (B) ao final do experimento	78
Figura 16	Imagens dos plaqueamentos dos solos dos tratamentos NF, F e N realizados antes da semeadura, no 21 DAS, 43 DAS e 78 DAS em meio ágar nutriente	80

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	**13**
1	**INTRODUÇÃO**	**13**
2	**REFERENCIAL TEÓRICO**	**15**
2.1	**Cianobactérias**	**15**
2.2	**Moléculas bioestimulantes produzidos pela cianobactéria**	**18**
2.3	**Aplicações biotecnológicas das cianobactérias**	**20**
2.4	**Feijão**	**22**
	REFERÊNCIAS	**27**
	SEGUNDA PARTE – ARTIGO	**35**
	ARTIGO – EVALUATION OF *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* AS A BIOINPUT IN COMMON BEAN NUTRITION	**36**
	TERCEIRA PARTE	**90**
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	**90**

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As cianobactérias são microrganismos procariontes amplamente adaptáveis, que desempenham um papel essencial na agricultura sustentável. Sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, especialmente em linhagens pertencentes à ordem Nostocales, e de produzir compostos bioativos, como exopolissacarídeos, faz com que esses microrganismos contribuam significativamente para a melhoria das propriedades químicas e físicas do solo, como no aumento da disponibilidade de nutrientes e na melhoria da retenção de nitrogênio e de água (Kaushik, 2014; Chittapun et al., 2018). Essas características tornam as cianobactérias uma alternativa promissora à substituição dos fertilizantes químicos, cujos efeitos negativos, como a contaminação ambiental e a degradação da saúde do solo, são amplamente reconhecidos (Guiducci; Vidal; Bertin, 2024).

O uso de cianobactérias como biofertilizantes resulta em benefícios diretos e indiretos para diversas culturas agrícolas. Em experimentos conduzidos com arroz (Oryza sativa L.), a aplicação desses microrganismos promoveu crescimento significativo das plantas e melhorias nas propriedades do solo. De forma semelhante, a combinação de cianobactérias com fertilizantes sintéticos NPK aumentou a produtividade do trigo (Triticum aestivum), reforçando seu papel como ferramentas biotecnológicas eficazes na agricultura (Chittapun et al., 2018).

No Brasil, o cultivo de feijão é de grande importância econômica, social e cultural, sendo amplamente consumido por sua acessibilidade e valor nutricional (CNA, 2024). O feijão preto, em particular, é uma fonte rica em proteínas, fibras, vitaminas do complexo B e minerais, como ferro, magnésio e potássio, desempenhando um papel importante na segurança alimentar e na promoção da saúde. Entre as variedades cultivadas, destaca-se o feijão preto Ouro Negro, introduzido no Brasil pela Embrapa em 1991. Essa cultivar foi desenvolvida para oferecer alta produtividade e resistência a doenças, além de boa adaptação às condições climáticas e do solo de diversas regiões do país (Embrapa, 1991).

Embora o uso de fertilizantes químicos seja uma prática comum no cultivo de feijão para suprir as necessidades nutricionais das plantas, sua aplicação intensiva e inadequada pode resultar em impactos negativos, como alterações nas atividades biológicas do solo e redução de sua fertilidade (Chen, 2006). Para reduzir esses efeitos, os biofertilizantes têm ganhado destaque como uma alternativa sustentável, pois, além de reduzir a dependência do uso de

insumos químicos, esses produtos promovem a regulação da dinâmica do solo, aumentam a diversidade microbiana e melhoram sua fertilidade (Chittapun et al., 2018).

Os biofertilizantes à base de cianobactérias, especialmente aqueles derivados de linhagens pertencentes à ordem Nostocales, têm se mostrado promissores no cultivo de leguminosas, como o feijão. Esses microrganismos, ao fixarem nitrogênio atmosférico, reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos, e produzirem compostos bioativos, como exopolissacarídeos, contribuem para a melhoria da agregação do solo e o aumento da sua capacidade de retenção de água. Além disso, promovem a atividade de microrganismos benéficos, como bactérias promotoras de crescimento vegetal e fungos micorrízicos, favorecendo a estrutura e a fertilidade do solo. Essas interações criam um ambiente mais equilibrado e funcional, aumentando a sustentabilidade do agroecossistema (Kaushik, 2014).

Assim, diversos estudos ainda são desenvolvidos com o intuito de identificar as formas mais eficientes de aplicação de cianobactérias como biofertilizantes. Nesse contexto, o presente estudo avalia o potencial da biomassa de linhagens pertencentes à ordem Nostocales como biofertilizante no cultivo de feijão preto Ouro Negro, com ênfase em seus efeitos sobre a microbiota do solo, as características de crescimento e a produtividade da planta. A pesquisa busca explorar como o uso dessas cianobactérias pode contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis, oferecendo soluções que aliem produtividade e conservação ambiental, promovendo, assim, uma produção de feijão mais sustentável e menos dependente de insumos químicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cianobactérias

As cianobactérias representam um dos grupos microbianos mais importantes em relação a história evolutiva do nosso planeta, principalmente devido ao desenvolvimento da capacidade de fotossíntese pelos seus ancestrais, o que contribuiu fortemente para a oxigenação dos oceanos e da atmosfera (Blankenship, 2010; Cardona et al., 2019). A endossimbiose envolvendo cianobactérias resultou na formação dos cloroplastos, estabelecendo a base da fotossíntese em eucariotos e tornando esse grupo essencial para a produção primária global (Archibald, 2015).

As cianobactérias foram identificadas em 1838 pelo cientista Ehrenberg, mas somente no ano de 1875, o cientista Thuret iniciou a sua classificação taxonômica (Andrade, 2023; Ribeiro, 2018). No entanto, desde então a sua classificação vem sendo discutida por apresentarem características semelhantes aos organismos pertencentes a dois grupos distintos: microalgas e bactérias. Em relação a estrutura e fisiologia, as cianobactérias podem apresentar semelhanças a bactérias, devido à ausência de núcleo e outras organelas, bem como podem apresentar parede celular de peptídioglicano semelhantes às das bactérias gram-negativas (Lee, 2018). Porém quando consideramos funcionalmente, as mesmas apresentam ser semelhantes às algas, principalmente devido a estrtura subcelular ser mais sofisticada e apresentar presença de pigmentos (Mavioso, 2020).

A sua variedade morfológica e funcional proporciona capacidade de adaptação em diversos ecossistemas aquáticos e terrestres, ou até mesmo em ambientes extremos como lagos hipersalinos, ambientes congelados e regiões desérticas (Ribeiro, 2018). Embora ainda exista pouca representação de cianobactérias provenientes de regiões polares e ambientes áridos, o crescente dados genômicos e metagenômicos vem melhorando de forma significativa a compreensão sobre a ampla diversidade das cianobactérias e suas relações evolutivas (Sánchez-Baracaldo, 2015; Boden et al., 2021; Chen et al., 2020).

Há uma década, grande maioria dos dados genômicos disponíveis eram táxons unicelulares de origens marinhas (Blank; Sánchez-Baracaldo, 2010). Porém nos últimos anos, com a expansão dos estudos genômicos de cianobactérias de origem terrestre e de água doce, esse cenário mudou, possibilitando assim análises genômicas comparativas, as quais revelam a evolução da estrutura genômica de cianobactéria de acordo com as restrições impostas pelos ambientes, seja ela terrestre, dulcícola ou marinho (Chen et al., 2020).

A morfologia da cianobactéria pode ser considerada simples porém variada, pois pode ser encontrada na forma unicelular, coloniais ou filamentosas. As filamentosas podem ser ramificadas ou não, e geralmente contribuem para a formação de biofilmes, representando importante papel biológico (Blank; Sánchez-Baracaldo, 2010). Apresentam parede celular de peptídeoglicano, semelhante ao das bactérias, porém esta camada é mais espessa, conferindo proteção contra plasmólise durante o fluxo de entrada e saída de nutrientes (De Rosa et al., 2024).

A reprodução ocorre de forma assexuada, através da fissão binária ou múltipla (Mavioso, 2020). As cianobactérias da ordem *Nostocales* e *Stigonematales* produzem hormogônios, filamentos formados por 5 a 15 células que se desprendem de uma colônia-mãe para formar novas colônias, funcionando como uma forma de reprodução vegetativa. Esses fragmentos são constituídos por cadeias curtas de células que se separam do filamento principal e movimentam-se ativamente, auxiliando na dispersão e colonização de novos ambientes. Esse processo é uma estratégia para a propagação das cianobactérias para diversos ambientes, principalmente em ambientes aquáticos, onde os hormogônios podem flutuar na água e se propagar para novos locais favoráveis para seu desenvolvimento (Flores; Herrero, 2014; Vinogradova, 2016).

As cianobatérias apresentam clorofila *a* como seu principal pigmento fotossintético, mas possuem também a ficocianina, um pigmento verde-azulado que confere a coloração às cianobactérias, o que deu origem ao nome de algas azuis (Andrade, 2023; Ribeiro, 2018). Algumas espécies ainda podem apresentar ficoeritrina, um pigmento que confere a coloração preta e/ou avermelhada às células (Vincent, 2009). Além disso, podem apresentar uma massa gelatinosa denominada mucilagem em volta da célula, o qual apresenta variação em sua consistência, espessura e no acúmulo de pigmentos de acordo com as condições ambientais, podendo conferir diferentes colorações à célula (Maltseva et al. 2025).

As cianobactérias apresentam, em sua maioria, metabolismo fotoautotrófico aeróbico, no qual utilizam a energia luminosa para a fixação de carbono, tendo a água como doadora de elétrons, processo que resulta na liberação de oxigênio molecular. Em condições anaeróbicas, especialmente em ambientes com baixa ou ausência de oxigênio, algumas linhagens são capazes de utilizar doadores alternativos de elétrons, como compostos reduzidos de enxofre (sulfeto de hidrogênio), mantendo a atividade fotossintética sem produção de oxigênio. Além disso, outras espécies podem apresentar metabolismo heterotrófico ou mixotrófico facultativo na ausência de luz, utilizando compostos orgânicos como fonte de carbono e energia (Whitton; Potts, 2012). Essa variabilidade metabólica confere às cianobactérias papel primordial nos ciclos biogeoquímicos do carbono, nitrogênio e de diversos minerais em ecossistemas aquáticos

e terrestres (Meriluoto; Spoof; Codd, 2017; Patel et al., 2017).

Falando ainda sobre o metabolismo de cianobactérias, algumas linhagens são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico (N_2) em formas biodisponíveis, como amônia (NH_3) ou íon amônio (NH_4^+). Cianobactérias da ordem *Nostocales* apresentam células especializadas denominadas heterócitos, as quais permitem a fixação de N_2 (Nicoletti, 2022). Embora uma ampla variedade de bactéria realize a fixação biológica de nitrogênio, as cianobactérias são consideradas os principais microrganismos fixadores de nitrogênio nos oceanos superficiais (Zehr, 2011.).

Alguns grupos de cianobactérias podem apresentar capacidade de diferenciação de células especializadas quando expostas a condições adversas, como por exemplo os acinetos. Acinetos são células de resistência que apresentam múltiplas camadas extracelular, e que têm a capacidade de armazenar proteínas em condições desfavoráveis e mantê-las até que as condições se tornem favoráveis à sua sobrevivência e desenvolvimento (Mavioso, 2020). Além disso, podem desenvolver vesículas gasosas denominadas aerótopos, que dão capacidade às cianobactérias de se movimentarem no sentido vertical na água, promovendo assim maior exploração de nutrientes, até mesmo em locais mais profundos (Adams; Duggan, 2008). Existem também grupos que apresentam a formação de heterócitos, células com capacidade de assimilação do N2 atmosférico na ausência de oxigênio a partir do complexo enzimático nitrogenase, o qual reduz o N2 atmosférico em amônia. Esta célula promove o desenvolvimento das cianobactérias por meio da mais variada fonte de nitrogênio, como nitrito, nitrato, ureia, aminoácidos, desde que sejam convertidos em amônia por este complexo (Mavioso, 2020).

O habitat mais comum das cianobactérias é aquático, mas como consequência da adaptação a outros ambientes, foram desenvolvidos diversos mecanismos protetores contra stress oxidativo. Como por exemplo, os compostos fenólicos, que são uma classe de metabólitos secundários que desempenham papéis importantes na defesa contra predadores, no combate ao estresse oxidativo, e na adaptação a condições ambientais adversas, tanto bióticos quanto abióticos. Esses compostos possuem uma estrutura química baseada em anéis aromáticos com grupos hidroxila, características que conferem a eles forte atividade antioxidante (Singh et al., 2017). Os compostos fenólicos das cianobactérias vêm ganhando atenção por seu potencial em aplicações biotecnológicas devido à sua ação antioxidante, anti-inflamatória, anticarcinogênica, antibacteriana e também antifúngica (SOUZA et al., 2010; SCAGLIONI et al., 2019). Entre os compostos fenólicos de cianobactérias estão ácidos fenólicos, flavonoides, ácido gálico e outros derivados aromáticos, os quais variam de acordo com as espécies e podem ser influenciados pelas condições ambientais em que se encontram (De Rosa et al., 2024).

As cianobactérias também possuem lipídios em sua estrutura, que desempenham funções essenciais na composição das membranas, no armazenamento de energia e na adaptação a condições ambientais adversas. Os triacilglicerídeos (TAGs) são os lipídios de armazenamento e são uma das principais matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel. As cianobactérias armazenam preferencialmente carbono na forma de glicogênio, porém há estudos que mostram a presença de TAGs em algumas espécies como *Nostoc punctiforme* e *Nostoc commune*, o qual está diretamente relacionado com a alta taxa fotossintética e crescimento elevado. Assim, o teor de lipídios das cianobactérias é considerado um potencial promissor para a produção de biodiesel (Souza, 2018).

Pode-se dizer que, as cianobactérias vêm se destacando cada vez mais como microrganismos que apresentam alto potencial biotecnológico, principalmente diante dos diversos estudos que demonstraram as suas capacidades metabólicas. Além de serem consideradas eficientes fixadora de nitrogênio e produtora de oxigênio, são capazes de sintetizar uma ampla diversidade de compostos bioativos, os quais podem ser utilizados em diversas áreas, como na produção de biocombustíveis, na indústria farmacêutica e cosmética, na produção de biofertilizantes, e até mesmo na biorremediação de efluentes. Assim, as pesquisas recentes otimizam o seu cultivo e o uso de forma direcionada, se tornando cada vez mais uma ferramenta que oferece soluções sustentáveis para os desafios ambientais.

2.2 Moléculas bioestimulantes produzidos pela cianobactéria

As cianobactérias são conhecidas pela sua capacidade de produzir metabólitos secundários que apresentam propriedades bioestimulantes, como por exemplo, os exopolissacarídeos (EPS) e os fitohormônios. Os exopolissacarídeos (EPS) são classe de metabólitos produzidos por *Nostoc*, com funções essenciais na proteção contra o estresse hídrico e na melhoria da estrutura do solo. Os EPS podem melhorar a retenção de umidade e a disponibilidade de nutrientes no solo, beneficiando diretamente o crescimento das plantas (de Caire et al., 1997).

Já os fitohormônios são capazes de regular os processos fisiológicos considerados essenciais para as plantas, como a germinação, crescimento radicular e tolerância ao estresse abiótico. Além disso, as cianobactérias são fontes de compostos bioestimulantes, compostos considerados importantes reguladores de crescimento vegetal (Paiva et al., 2023).

As cianobactérias sintetizam e fazem a liberação de EPS e de fitohormônios no ambiente através de processos metabólicos naturais. Esses compostos podem ser excretados diretamente

no meio ou liberados durante a sua decomposição celular. No solo, os fitohormônios produzidos por cianobactérias podem interagir com as raízes das plantas, promovendo o crescimento e desenvolvimento vegetal. Os fitohormônios produzidos pelas cianobactérias são auxinas, citocininas, giberelinas, ácido abscísico e etileno, e suas respectivas funções são apresentados abaixo conforme (Ferreira; Ferreira, 2023).

- Auxinas: promovem o alongamento, diferenciação e divisão celular;
- Citocininas: são capazes de estimular a divisão celular e retardam o envelhecimento das folhas;
- Giberelinas: influenciam na germinação das sementes, no crescimento do caule e na floração;
- Ácido abscísico: resposta ao estresse e regulação da abertura estomática;
- Etileno: influência na maturação dos frutos e na resposta ao estresse.

A produção de tais fitohormônios pode variar de acordo com a espécie e das condições ambientais onde se encontram. O ácido indolacético (AIA), por exemplo, é uma auxina sintetizadas pelas cianobactérias dos gêneros *Nostoc*, *Anabaena* e *Calothix* e desempenha um importante papel no desenvolvimento das plantas. AIA auxilia no processo de divisão e alongamento celular, na diferenciação de tecido, formação de raízes e na regulação da expressão gênica relacionada ao crescimento da planta (Radmann; Chinello; Peters, 2002). Estudos com a aplicação exógena de AIA vem sendo desenvolvidos e foram observados a melhora no enraizamento da planta e no desenvolvimento de mudas, demonstrando a sua importância no crescimento e desenvolvimento das plantas através da função de regulação de diversos processos fisiológicos (Meneguzzi et al., 2014).

Em relação as citocininas, as cianobactérias do gênero *Nostoc* são conhecidas pela capacidade em sintetizar as citocininas e auxiliar no processo de divisão e alongamento celular, respiração e fotossíntese, além de retardar o processo de senescência das plantas (de Melo, 2002). Já as giberelinas vem sendo relatadas em alguns estudos com o uso de cianobactéria do gênero *Anabaena*, podendo influenciar no crescimento da planta através da modulação de processos como germinação de sementes e alongamento celular (de Melo, 2002; Stirk et al., 2002).

Assim, há diversos estudos desenvolvidos que demonstram o uso de cianobactérias como biofertilizante, utilizados para aplicação no solo e nas plantas. A aplicação da biomassa de *Nostoc* por exemplo, foi associada ao aumento na biomassa vegetal e na taxa de fotossíntese

devido à disponibilização de nitrogênio fixado e substâncias bioestimulantes, além da melhora na estrutura do solo, elevando a capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes (Esch, 2014).

O potencial uso de biomassa de cianobactérias como biofertilizante é visto como promissor, principalmente devido à sua capacidade de produzir fitohormônios e exopolissacarídeos que beneficiam o crescimento vegetal. Porém, ainda é necessário avançar na compreensão dos mecanismos envolvidos na interação planta-cianobactéria para desenvolver estratégias que melhoram a sua aplicação.

2.3 Aplicações biotecnológicas das cianobactérias

As cianobactérias são microrganismos considerados fundamentais no ciclo do carbono e no fornecimento de oxigênio, e estudos mostram que elas possuem várias aplicações biotecnológicas promissoras em diversas áreas, como na saúde, agricultura, meio ambiente e bioenergia (Pinotti; Segato, 1991).

As cianobactérias contam com compostos biológicos que podem ser utilizados como fonte alternativa de nutrição da saúde humana. São capazes de produzir enzimas como β-lactase e protease, e são frequentemente utilizados como suplementos nutricionais devido a presença de carotenoides, ácidos graxos e diversas vitaminas (Cardozo et al., 2007; Bishop; Zubeck, 2012; Guedes et al., 2013). Já na nutrição animal, são incluídos frequentemente a astaxantina, um aditivo alimentar para peixes como salmão, truta e camarão para alteração da cor da carne. Além disso, pode ser incluído na alimentação das aves para intensificar a cor da gema do ovo (De Rosa et al., 2024).

Já na indústria farmacêutica e cosmética, devido a ampla variedade de compostos bioativos como peptídeos, proteínas, antioxidantes e polissacarídeos, com propriedades antimicrobianas, anticancerígenas, anti-inflamatórias e imunomoduladoras, estudos estão sendo desenvolvidos para produção de diversos medicamentos e suplementos. Além das substâncias como a ficocianina e clorofila, que são utilizados nas produções de batons e cremes devido às suas propriedades antioxidantes (Mišurcová; Orsavová; Ambrožová, 2015; Bavini, 2018).

Em específico a *Nostoc spp.* é um gênero de cianobactéria bastante estudada para desenvolvimento de bioprodutos de diversas áreas industriais. *Nostoc ellipsosporum* foi relatada como produtora de composto com atividade antiviral denominada *cianovirina-N*, uma proteína que tem a capacidade de inativar irreversivelmente cepas primárias do vírus da HIV (Kumar et al., 2019). O composto *nostoflan*, extraído da cianobactéria terrestre *Nostoc*

flagelliforme demonstrou efeitos significativos no combate ao vírus do herpes simples tipo 1 (HSV-1), ao tipo 2 (HSV-2), ao citomegalovírus humano e ao vírus da gripe A, demonstrando o potencial uso como antiviral para tratamento de tais infecções (Kanekiyo et al., 2005; Hayashi et al., 2008). Nostocarbolina, um alcalóide β-carbolinium quaternário isolado da cianobactéria *Nostoc* 78-12A apresentou efeitos inibitórios de *Plasmodium falciparum*, um protozoário causador da malária em humanos (Barbaras et al., 2008). Abed, Dobretsov e Sudesh (2009) relataram que *Nostoc commune* contém uma quantidade elevada de proteínas e fibras, sendo uma fonte nutricional importante para a alimentação humana. Dentre diversos gêneros de cianobactérias, *Nostoc* foi reportada como produtores de hidrogênio sob condições específicas de crescimento, devido a presença de heterócitos, o qual está diretamente relacionado com o seu potencial de produção de biocombustível (Kumar et al., 2019). O *Nostoc* é uma cianobactéria heterocística relatada principalmente pela sua característica de fixação de nitrogênio, um processo essencial para a agricultura, especialmente em campos de arroz. Além disso, podem formar associações simbióticas com plantas, auxiliando no maior fornecimento de nitrogênio para o crescimento vegetal (Signh et al., 2016).

Em relação a sua aplicação ambiental, as cianobactérias também apresentam diversos usos importantes. Como por exemplo o seu uso no tratamento de águas residuais, o que contribui para a redução de substâncias como cloretos e fenóis, além da capacidade de realizarem a fixação de metais pesados (El-Bestawy, 2008; Gademann, 2007).

As cianobactérias também se destacam pelo seu uso como biofertilizantes, atuando como bioestimulantes do solo. Algumas espécies de cianobactérias integram uma comunidade de procariotos denominados como rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (Plant Growth Promoting Rhizobacteria – PGPR), as quais apresentam capacidade de elevar o suprimento de nutrientes necessários para o crescimento da planta, além de melhorar a estrutura do solo e capacidade de retenção de água (Singh et al., 2016). Além da capacidade de fixação de nitrogênio, há liberação de fitohormônios (como auxinas, giberelinas, citocininas e etileno), aminoácidos e vitaminas, solubilização de minerais como fósforo, potássio e zinco, e formação de biofilmes, que juntos, contribuem para o melhor desenvolvimento das plantas (De Rosa et al., 2024). Há estudos que indicam a ampla identificação de cianobactérias em campos de arroz irrigado, observando maior comprimento de raiz e da parte aérea (Priya et al., 2015), coloração mais verde e grãos mais pesados (Iniesta-Pallarés et al., 2021).

Além dos estudos em arrozais, vem sendo desenvolvido diversos estudos com cianobactérias como biofertilizantes em outras culturas, como cevada, trigo, tomate, alface,

pepino, rabanete, entre outros, em que vem apresentando efeitos positivos na produtividade (Hashtroudi et al., 2013; Prasanna et al., 2013; Khadarate e Suryawanshi, 2016).

Diante disso, observa-se que as cianobactérias constituem um grupo de microrganismos com grande importância biotecnológica, com amplo potencial de aplicação em diferentes setores. Em especial, o gênero *Nostoc spp*. se destaca pela diversidade de metabólitos bioativos produzidos, capacidade de fixação biológica de nitrogênio, formação de associações simbióticas e pelo papel como rizobactéria promotora do crescimento vegetal. Tais características conferem a esse gênero um grande potencial para o desenvolvimento de biofertilizantes, bioestimulantes e outros bioinsumos sustentáveis, contribuindo para a redução do uso de insumos químicos sintéticos e para o avanço de práticas agrícolas mais sustentáveis.

2.4 Feijão

O feijão é a leguminosa mais consumida mundialmente e é uma importante fonte de proteína vegetal. Historicamente, o feijão-comum, pertencente ao gênero *Phaesolus* apresentou evolução de uma linhagem selvagem encontrado na América Central para um cultivo domesticado, passando por mutações e seleção genética, e se tornou umas das leguminosas cultivadas nos mais diversos ambientes (Oliveira; Wander, 2023). Especificamente o feijão preto, é uma leguminosa originária da América do Sul, sendo famoso pelo seu uso na produção de feijoada, um prato típico que surgiu nos meados do século XIX. O feijão-preto já era conhecido pelos nativos indígenas como *comanda, comaná* ou *cumaná*, e tal leguminosa teve importante papel na colonização, sendo descrito por diversos historiadores a sua importância para a dieta do brasileiro (Elias, 2007).

O feijão está presente em cerca de 70% das refeições da população brasileira, desempenhando papel importante na segurança alimentar e nutricional do país (Wander, 2018). O consumo médio per capita de feijão no Brasil foi de 12,8 $kg.hab^{-1}$ em 2023 e 13,2 $kg.hab^{-1}$ em 2024, valores inferiores aos observados em décadas anteriores, quando o consumo atingiu cerca de 18,8 $kg.hab^{-1}$ em 1996, evidenciando uma tendência de redução ao longo do tempo. No entanto, apesar dessa queda, o feijão ainda continua sendo um dos principais alimentos da dieta brasileira, destacando-se como importante fonte de proteína vegetal e minerais como ferro e zinco (Gonçalves, 2024; Embrapa, 2025).

O feijão apresenta também importante efeito fisiológico causado pela presença de fibras alimentares, que auxilia na prevenção de diarreias, redução do desenvolvimento de câncer de

cólon, controle da pressão arterial e na tolerância à glicose através de estímulo indireto do sistema imunológico (Fernandes; Dutra; Proença, 2007).

Uma das principais características do feijão é a alta adaptabilidade, facilitando o cultivo em diversas regiões do país (Oliveira; Wander, 2023). Nesse contexto, o Brasil se destaca como um dos maiores produtores e consumidores mundiais de feijão. A produção nacional foi estimada em 3,07 milhões de toneladas na safra de 2024/2025, o que manteve o país entre os três maiores produtores mundiais juntamente com a Índia e Mianmar. Apesar da alta produção, o Brasil ainda depende de importações de feijão para complementar a demanda do mercado interno, principalmente em períodos de menor oferta, ficando entre os principais importadores mundiais do grão com volumes que variam de 250 a 300 mil toneladas anuais nos últimos anos (FAO, 2024).

No Brasil, a cultura do feijão apresenta um sistema produtivo caracterizado pela realização de até três safras ao longo do ano, o que possibilita maior regularidade no abastecimento do mercado interno. A primeira safra, conhecida como safra das águas, ocorre principalmente entre os meses de setembro e dezembro, sendo favorecida pelas condições de maior precipitação. A segunda safra, denominada safra da seca ou safrinha, é cultivada entre janeiro e março e atualmente representa a maior parcela da produção nacional. Já a terceira safra, ou safra de inverno, é realizada predominantemente sob irrigação entre abril e julho, apresentando elevado nível tecnológico e produtividade. Esse sistema de cultivo escalonado contribui para a estabilidade da oferta de feijão ao longo do ano no país (CONAB, 2024; BARBOSA; GONZAGA, 2012).

O feijão-preto é amplamente produzido em diversos estados brasileiros, destacando-se Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Paraná. Entre esses, o estado do Paraná se destaca como principal produtor nacional, sendo responsável por cerca de 70% da produção total do país. Tais estados também representam os maiores consumidores do grão, juntamente com o estado do Rio de Janeiro. Além da produção nacional, o Brasil conta com cerca de 2% de importação do feijão-preto da Argentina. A Argentina é o segundo maior produtor de feijão do Mercosul, destinando praticamente toda a produção de feijão-preto à exportação, sobretudo para o mercado brasileiro (Salvador; Pereira, 2021; CNA, 2024; Compre rural 2019).

O feijoeiro apresenta diferentes características agronômicas que variam conforme o cultivar, especialmente em relação ao hábito de crescimento, que pode ser classificado como determinado ou indeterminado. No hábito determinado, o desenvolvimento vegetativo da planta é limitado após o início da floração, de modo que o crescimento do caule principal se encerra com a formação de uma inflorescência. Por outro lado, no hábito indeterminado, as plantas

continuam emitindo folhas e ramos mesmo durante a fase reprodutiva, permitindo crescimento vegetativo simultâneo à floração e formação das vagens (da Costa, 2023). Além dessa classificação, os feijoeiros também podem ser agrupados em quatro tipos de crescimento (I, II, III, e IV), de acordo com o hábito de crescimento e distribuição da estrutura reprodutiva. O tipo I são do grupo de hábito de crescimento determinado, porte ereto, e é considerado ideal para colheita mecanizada. Tipo II, III e IV apresentam hábito de crescimento indeterminado, sendo semiereto, prostado e trepador, respectivamente (Oliveira et al., 2018). O ciclo vegetativo do feijoeiro pode variar entre 60 e 115 dias, dependendo do cultivar e das condições ambientais, sendo o ciclo médio de aproximadamente 90 dias. O desenvolvimento da cultura é dividido em estádios fenológicos que representam as fases vegetativa e reprodutiva da planta. A fase vegetativa (V) é constituída pelos estádios V0, V1, V2, V3 e V4, e a reprodutiva (R) pelos estádios R5, R6, R7, R8 e R9 (Oliveira et al., 2018). Essa escala fenológica é amplamente utilizada para compreender e monitorar o desenvolvimento da cultura, além de auxiliar no manejo agronômico e na definição de práticas de cultivo.

Dentre os diferentes cultivares de feijão-preto, destaca-se a cultivar Ouro Negro, originário de Honduras e introduzida no Brasil com a denominação Honduras 35 no ano de 1991 (Alzate-Marin et al., 2003). Posteriormente, essa cultivar foi incorporada aos programas de melhoramento genético, sendo amplamente estudada quanto ao seu desempenho produtivo em diferentes regiões e épocas de cultivo. O desenvolvimento dessa cultivar teve como objetivo disponibilizar um material com elevada produtividade, resistência a doenças e boa adaptação às condições edafoclimáticas de diversas regiões do Brasil (Embrapa, 1991; Alzate-Marin et al., 2003). Estudos conduzidos em diferentes regiões agrícolas demonstraram que a cultivar Ouro Negro apresenta elevado potencial produtivo, com bom desempenho tanto na safra das águas quanto na safra da seca, sendo especialmente recomendada para cultivo nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (Pereira et al., 2023). Essas características são resultado de processos de melhoramento genético e de avaliações agronômicas realizadas em diferentes ambientes de cultivo, garantindo maior estabilidade produtiva e adaptação a diferentes condições climáticas e de solo, especialmente em regiões de Cerrado.

Entre suas principais características agronômicas, a cultivar Ouro Negro apresenta hábito de crescimento indeterminado, sendo classificada como intermediária entre os tipos II e III, com porte variando de semiereto a prostrado. O ciclo vegetativo situa-se entre 80 e 100 dias, sendo considerado de ciclo médio, com floração ocorrendo aproximadamente entre 35 e 44 dias após a emergência. A Tabela 1 apresenta as principais características agronômicas do feijão-preto cultivar Ouro Negro.

Tabela 1 – Características agronômicas do feijoeiro Ouro negro (Honduras 35)

Categoria	Característica
Grupo comercial	Preto
Ciclo vegetativo	80 - 100 dias
Floração	35 - 44 dias
Cor da flor	Violeta
Cor da vagem durante a maturação	Arroxeada
Cor da vagem madura	Amarelo-areia ou marrom
Cor da semente	Preto
Brilho da semente	Opaco
Hábito de crescimento	Indeterminado (tipo intermediário entre II e III)
Porte da planta	Semiereto e prostado
Peso de 100 sementes com 14% de umidade	25 – 27 g

Fonte: Adaptado Embrapa (1991)

Os grãos do Ouro negro possuem uma coloração preta uniforme e intensa, sendo bastante valorizado pelos consumidores pela sua aparência marcante. Além disso, estudos mostraram a alta capacidade de fixação de N_2 e de resistências à doenças como o crestamento bacteriano comum, mosaico comum e antracnose, o que pode ser benéfico para redução do uso de insumos e contribuir para maior segurança alimentar (Embrapa, 1991).

2.5 Biofertilizantes

Os biofertilizantes são produtos que contêm microrganismos vivos capazes de colonizar a rizosfera, a superfície ou os tecidos internos das plantas, promovendo o crescimento vegetal por meio do aumento da disponibilidade e da absorção de nutrientes, além da produção de compostos bioativos que favorecem o desenvolvimento das culturas (Daniel et al., 2022; Shahwar et al., 2023). Esses insumos vêm ganhando destaque devido à sua capacidade de melhorar a fertilidade do solo e a eficiência do uso de nutrientes, contribuindo para sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente adequados.

Os mecanismos de ação dos biofertilizantes envolvem diferentes processos biológicos, dentre os quais se destacam a fixação biológica de nitrogênio atmosférico, a solubilização e mineralização de fósforo, a mobilização de potássio e micronutrientes, a síntese de fitohormônios e a produção de metabólitos capazes de estimular o crescimento vegetal (Pirttilä et al., 2021; dos Reis et al., 2024). Além disso, muitos microrganismos promotores de crescimento vegetal atuam na melhoria da arquitetura radicular, favorecendo a absorção de água e nutrientes e aumentando a tolerância das plantas a diferentes condições de estresse ambiental (Ansabayeva et al., 2025; Wang et al., 2026).

Entre os principais grupos de microrganismos utilizados como biofertilizantes destacam-se bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), fungos micorrízicos arbusculares, bactérias solubilizadoras de fosfato e cianobactérias. Esses organismos estabelecem interações benéficas com as plantas, contribuindo para a ciclagem de nutrientes, melhoria da atividade biológica do solo e incremento da produtividade agrícola (Shahwar et al., 2023; Figiel et al., 2025). Estudos recentes demonstram que a aplicação de biofertilizantes pode aumentar a população microbiana do solo, estimular a atividade fotossintética e promover ganhos de produtividade em diferentes culturas agrícolas (Nabati et al., 2025).

As cianobactérias constituem um grupo de especial interesse entre os biofertilizantes devido à sua capacidade de realizar fotossíntese oxigênica e, em muitas espécies, fixar nitrogênio atmosférico por meio da enzima nitrogenase. Além disso, esses microrganismos são capazes de produzir fitohormônios, aminoácidos, vitaminas, polissacarídeos extracelulares e outros metabólitos que favorecem o crescimento vegetal e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Nawaz et al., 2024; Jurado-Flores et al., 2025). Dessa forma, a utilização de biomassa de cianobactérias como biofertilizante tem sido considerada uma alternativa promissora para aumentar a disponibilidade de nutrientes e estimular o desenvolvimento das plantas, especialmente em sistemas agrícolas que buscam maior eficiência no uso de insumos.

Nos últimos anos, o interesse pela utilização de biofertilizantes tem aumentado significativamente em razão da necessidade de desenvolver estratégias capazes de melhorar a produtividade agrícola e, simultaneamente, preservar a qualidade dos recursos naturais. Nesse contexto, a aplicação de microrganismos benéficos representa uma ferramenta importante para o manejo da fertilidade do solo, contribuindo para a manutenção da atividade biológica e para o fornecimento gradual de nutrientes às plantas (Mahmoudi, 2025; Zhang et al., 2025).

REFERÊNCIAS

ABED, R. M. M; DOBRETSOV, S.; SUDESH, K. **Application of cyanobacteria in biotechnology**. J. Appl. Microbiol., v. 106, p. 1-12, 2009.

ADAMS, D.G.; DUGGAN, P.S. **Signalling in cyanobacteria–plant symbioses**. In: Perotto S, Baluška F, eds. Signaling and communication in plant symbiosis, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 93–121, 2012.

AHAD, R.I; GOSWAMI, S; SYIEM, M.B. **Biosorption and Equilibrium Isotherms Study of Cadmium Removal by *Nostoc muscorum* Meg 1: Morphological, Physiological and Biochemical Alterations**. 3 Biotech, v. 7, n. 104, 2017.

ÁLVAREZ, C. et al. **Symbiosis between cyanobacteria and plants: from molecular studies to agronomic applications.** Jornal of Experimental Botany, v. 74, n. 19, p. 6145-6157, 2023.

ALZATE-MARIN, A. L et al. **Characterization of the anthracnose resistance gene present in Ouro Negro (Honduras 35) common bean cultivar**. Euphytica, v. 133, p. 165–169, 2003.

AMORIM, L; REZENDE, J. A. M; FILHO, A. B. **Manual de Fitopatologia Principios e Conceitos**. Vol 2. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2018.

ANDRADE, L. L. **As cianobactérias e a origem do oxigênio**. Disponível em: <https://curtamicro.microbiologia.ufrj.br/cianobacterias-e-o-surgimento-do-oxigenio/>. Acesso em 07/12/2023.

ARCHIBALD, J.M. **Endosymbiosis and eukaryotic cell evolution**. Curr. Biol., v.25, p.911–921, 2015.

ANSABAYEVA, A. et al. **Plant Growth-Promoting Microbes for Resilient Farming**. *Horticulturae*, v. 11, n. 3, 2025.

BARBARAS, D et al. Potent and selective antiplasmodial activity of the cyanobacterial alkaloid nostocarboline and its dimmers. Bioorg. Med. Chem. Lett., v. 18, p. 4413-4415, 2008.

BARBOSA, F. R.; GONZAGA, A. C. O. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: 2012–2014.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2012. 247 p. (Série Documentos, 272). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/926285/1/seriedocumentos272.pdf >. Acesso em: 04/03/2026.

BAVINI, J. M. **Cyanobacteria in Skin Protection**. 2018. Tese (Mestrado em Biologia e Gestão da Qualidade da Água) – Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2018.

BISHOP, W. M; ZUBECK, H. M. **Evaluation of Microalgae for use as Nutraceuticals and Nutritional Supplements**. Journal of Nutrition & Food Sciences, v. 2, n. 5, p. 1–6, 2012.

BLANKENSHIP, R.E. **Early evolution of photosynthesis**. Plant Physiol., v. 154, p. 434–438, 2010.

BLANK, C.E.; SÁNCHEZ-BARACALDO, P. **Timing of morphological and ecological innovations in the cyanobacteria– a key to understanding the rise in atmospheric oxygen.** Geobiology, v. 3, p. 145–165, 2010.

BLOKHINA, O; FAGERSTEDT, K. V. **Reactive oxygen species and nitric oxide in plant mitochondria: Origin and redundant regulatory systems**. Physiologia Plantarum, v. 138, n. 4, p. 447–462, apr, 2010.

BODEN, J. et al. **Timing the evolution of cyanobacterial antioxidants: superoxide dismutases**. Nature Communications, [s.l.], v.12, p.1–12, 2021.

CARDONA, T. et al. **Early Archean origin of Photosystem II**. Geobiology, v.17, p. 127–150, 2019.

CARDOZO, K. H. M et al. **Metabolites from algae with economical impact**. Comparative Biochemistry and Physiology - C Toxicology and Pharmacology, v. 146, n. 1-2, p. 60-78, 2007.

CARVALHO, V; NETO, A. A. C. **Espécies reativas de oxigênio em plantas**. In: PEÑA, M. (Ed.). VI Botânica de Inverno. 1. ed. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2016. p. 223.

CHEN, J. **The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility**. International Workshop on Sustained Management of the Soil-Rhizosphere System for Efficient Crop Production and Fertilizer Use, Bangkok, pp 1–11, 2006.

CHEN, M.Y. et al. **Comparative genomics reveals insights into cyanobacterial evolution and habitat adaptation**. ISME J., v.15, p. 211–227, 2020.

CHITTAPUN, S et al. **Effects of using cyanobacteria and fertilizer on growth and yield of rice, Pathum Thani I: a pot experiment**. J. Appl. Phycol, v.30, p. 79–85, 2018.

CHOOCHOTE, W; SUKLAMPOO, L; OCHAIKUL, D. **Evaluation of antioxidant capacities of green microalgae**. Journal of Applied Phycology, v. 26, n. 1, p. 43-48, 2014.

COMPRE RURAL. **Feijão: importância, demanda e estados brasileiros que mais colhem**. Disponível em: < https://www.comprerural.com/feijao-importancia-demanda-e-estados-brasileiros-que-mais-colhem/#:~:text=MERCADO%20DOM%C3%89STICO%20%E2%80%93%20DIVERG%C3%8ANCIAS%20REGIONAIS,Regi%C3%A3o%20Norte/Nordeste%20do%20Pa%C3%ADs.>. Acesso em 30/10/2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Brasil deve produzir 299,27 milhões de toneladas de grãos na safra 2023/2024**. Disponível em: < https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5615-brasil-deve-produzir-299-27-milhoes-de-

toneladas-de-graos-na-safra-2023-2024#:~:text=Para%20o%20feij%C3%A3o%2C%20a%20previs%C3%A3o,previs%C3%B5es%20para%20a%20terceira%20safra.>. Acesso em 09/11/2024.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA. **Feijão**. Disponível em: < https://cnabrasil.org.br/feijoes#:~:text=Feij%C3%A3o%20Comum%20Preto&text=Apesar%20de%20ser%20a%20principal,e%20o%20consumo%20dessa%20variedade.>. Acesso em 30/10/2024.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: Safra 2024/2025**, 5º Levantamento. Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: < chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/5o-levantamento-safra-2024-25/apresentacaoz5zlevzsafrazgraosz-zfev-24.pdf>. Acesso em 01/06/2026.

CORPUS-GOMEZ, A et al. **Cushuro (*Nostoc sphaericum)*: habitat, características fisicoquímicas, composición nutricional, formas de consumo y propriedades medicinales**. Agroind. Sci., v. 11, n. 2, p. 231-238, 2021.

DA COSTA, J. G. C. **Morfologia**. Disponível em: < https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/morfologia#:~:text=As%20plantas%20de%20feijoeiro%20podem,vegetativa%20ou%20floral%20e%20vegetativa.>. Acesso em 21/11/2024.

DANIEL, A. I. et al. **Biofertilizer: The Future of Food Security and Food Safety**. *Microorganisms*, v. 10, 2022.

DE ALENCAR, D. B et al. **Fatty acid composition from the marine red algae *pterocladiella capillacea* (S. G. gmelin) *santelices* & *hommersand* 1997 and *osmundaria obtusiloba* (C. agardh) *R. E. norris* 1991 and its antioxidant activity**. Anais Da Academia Brasileira de Ciências, v. 90, n. 1, p. 449–459, 2018.

DE CAIRE, G. Zulpa et al. **Exopolysaccharide of *Nostoc muscorum* (Cyanobacteria) in the aggregation of soil particles**. Journal of Applied Phycology, v. 9, p. 249-253, 1997.

DE MELO, N. F. **Introdução aos hormônios e reguladores de crescimento vegetal**. I Seminário de Coda de Nutrição Vegetal, Embrapa Semi-árido, Petrolina, Pernambuco, 2002.

DE ROSA, T. et al. **Harnessing Cyanobacteria's Bioactive Potential: A Sustainable Strategy for Antioxidant Production**. Microorganisms, v. 12, n. 1, p. 175, 2024.
DODDS, W. K; GUDDER, D. A; MOLLENHEUER, D. The ecology of *Nostoc*. Jounal of Phycology, v. 31, p. 2-18, feb, 1995.

DOS REIS, G. A. et al. **Comprehensive Review of Microbial Inoculants**. *Sustainability*, v. 16, 2024.

DVOŘÁK, P et al. **Diversity of the Cyanobacteria**. In Modern Topics in the Phototrophic Prokaryotes: Environmental and Applied Aspects, pp. 3–46, 2017.

ELIAS, R. **Feijoada: breve história de uma instituição comestível**. Textos do Brasil, edição 13, 2007.

El-BESTAWY, E. **Treatment of mixed domestic-industrial wastewater using cyanobacteria**. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, v. 35, n. 11, p. 1503–1516, 2008.

El SHAFAY, S.M. et al**. Influence of Nutrient Manipulation on Growth and Biochemical Constituent in *Anabaena variabilis* and *Nostoc muscorum* to Enhance Biodiesel Production.** Sustainability, v. 13, n. 16, 9081, 2021.

EMBRAPA. **OURO Negro: cultivar recomendada para Minas Gerais e Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/213349>. Acesso em 21/11/2024.

ESCH, C. A **Native Cyanobacteria, Nostoc, as a Biofertilizer**. 2014. Thesis Projects (Bachelor of Science) - Honors College Graduate Distinction, Western Kentucky University, Kentucky, 2014.

FERREIRA, B. L. DE S; FERREIRA, F. A. P. **Estudo do uso de microalgas na agricultura com ênfase em biofertilizantes**. 2023. Projeto final (Bacharel em Engenharia química e Engenharia industrial) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

FERNANDES, A. C.; DUTRA, B. E.; PROENÇA, R.P.C. **Critérios de qualidade nutricional e sensorial de preparações de feijão preto e vermelho**. Nutrição em Pauta, v. 85, p. 68-72, 2007.

FIGIEL, S. et al. **Microbially Enhanced Biofertilizers: Technologies and Applications**. *Agronomy*, v. 15, 2025.

FLORES, E; HERRERO, A. **The cell biology of cyanobacteria**. Norfolk, UK: Caister Academic Press, 2014.

GADEMANN, K. **Cyanobacterial Natural Products for the Inhibition of Biofilm Formation and Biofouling**. CHIMIA International Journal for Chemistry, v. 61, n. 6, p. 373–377, 2007.

GARLAPATI, D. et al. **Role of cyanobacteria in agricultural and industrial sectors: an outlook on economically important byproducts.** Applied Microbiology and Biotechnology, v. 103, p. 4709–4721, 2019.

GHEDA, S.F; AHMED, D.A. **Improved Soil Characteristics and Wheat Germination as Influenced by Inoculation of *Nostoc kihlmani* and *Anabaena cylindrica***. Rend. Lincei, v. 26, p. 121–131, 2015.

GUEDES, A. C et al. **Optimization of ABTS radical cation assay specifically for determination of antioxidant capacity of intracellular extracts of microalgae and cyanobacteria**. Food Chemistry, v. 138, n. 1, p. 638–643, 2013.

GUIDUCCI, R. do C. N; VIDAL, W. C. L; BERTIN, P. R. B**. Impacto econômico e ambiental *ex ante* de biofertilizante foliar com extratos de biomassa de cianobactéria da biodiversidade brasileira.** In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia rural, v. 62., 2024, Palmas. Bioeconomia, cadeias de valor e desafios do desenvolvimento regional: [anais...]. Brasília, DF: SOBER, 2024.

GOIRIS, K et al. **Antioxidant potential of microalgae in relation to their phenolic and carotenoid content**. Journal of Applied Phycology, v. 24, n. 6, p. 1477–1486, 2012.

GONÇALVES, L. **O consumo de feijão caiu no Brasil?** IBRAEFE. Disponível em: < https://www.ibrafe.org/noticias/o-consumo-de-feijao-caiu-no-brasil#:~:text=Segundo%20estimativas%20da%20Embrapa%20Arroz,kg%2Fhab%2C%20em%201996.>. Acesso em 30/10/2024.

HAYASHI, K et al. **Antiinfluenza A virus activity of an acidic polysaccharide from a blue green algae *Nostoc flagelliforme***. Planta Med., v. 74, p. 34, 2008.

INIESTA-PALLARÉS M. et al. 2021. **Sustaining rice production through biofertilization with N2-fixing cyanobacteria**. Applied Sciences, v. 11, p. 4628, 2021.

JURADO-FLORES, A. et al. **Harnessing Microalgae and Cyanobacteria for Sustainable Agriculture**. *Agriculture*, v. 15, 2025.

KANEKIYO, K et al., **Isolation of an antiviral polysaccharide, nostoflan, from a terrestrial cyanobacterium, *Nostoc fladelliforme*.** J. Nat. Prod, v 68, p. 1037-1041, 2005.

KAPOOR, D et al. **Antioxidant enzymes regulation in plants in reference to reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS)**. Plant Gene, v. 19, n. April, p. 100182, 2019.

KAUSHIK, B. D. **Developments in cyanobacterial biofertilizer**. Proc Indian Nat Sci Acad, v.80, n. 2, p.379–388, 2014.

Kumar, J et al. **Cyanobacteria: Applications in Biotechnology**. In: Cyanobacteria From Basic Science to Applications, p. 327–346, 2019.

LEE, R. E. **Phycology**. In Phycology (4th ed.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2018.

LI, H; ZHAO, Q; HUANG, H. **Current states and challenges of salt-a ected soil remediation by cyanobacteria**. Sci. Total Environ., v. 669, p. 258–272, 2019.

LIU, H. K. et al. **Effects of elicitation on bioactive compounds and biological activities of sprouts**. Journal of Functional Foods, v. 53, n. 1, p. 136–145, feb. 2019.

MAHMOUDI, M. **Biofertilizers for Sustainable and Environment-friendly Agriculture**. National Biotechnology and Sustainable Environment Journal, 2025.

MALTSEVA I. et al. **Antioxidant Status of Cyanobacteria Strains During Long-Term Cultivation in Nitrogen-Free Media**. Int. J. Mol. Sci., v. 26, n. 22, p. 10891, 2025.

MAVIOSO, I. C. V. DA C. **Identificação de espécies de cianobactérias potencialmente tóxicas, no reservatório de ALqueva por PCR em Tempo Real e DNA barcoding**. 2020. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Évora, 2020.

MENEGUZZI, A et al. **Ácido indolacético influencia no enraizamento de estacas de *Pittosporum tobira***. Revista de Ciências Agroveterinárias, v.14, n.1, p.24-28, 2015.

MERILUOTO, J; SPOOF, L; CODD, G. A. **Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis**. Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons, 2017.

MIŠURCOVÁ, L; ORSAVOVÁ, J; AMBROŽOVÁ, J. V. **Algal Polysaccharides and Health**. In K. G. Ramawat & J. M. Mérillon (Eds.), Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology, p. 109–144, 2015.

NABATI, J. et al. **Biofertilizers Containing Plant Growth Promoting Rhizobacteria**. Scientific Reports, 2025.

NAWAZ, T. et al. **Harnessing the Potential of Nitrogen-Fixing Cyanobacteria**. Current Research in Environmental Sustainability, v. 8, 2024.

NICOLETTI, M. **Chapter 10 - The nutraceutical potential of cyanobacteria**. The Pharmacological Potential of Cyanobacteria, Academic Press, p. 287-330, 2022.

OLIVEIRA DE. G, M; WANDER, A.E. **Mapeamento da cadeia produtiva do feijão-comum no Brasil**. Rev. Econom. Política de Desenvolv, v. 14, n. 32, p. 96-122, 2023.

OLIVEIRA, M. G. C et al. **Conhecendo a Fenologia do Feijoeiro e Seus Aspectos Fitotécnicos.** Embrapa, 59p., 2018.

PAIVA, C. A. DE O. et al. 3. Inoculantes e seus efeitos sobre as plantas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168585/1/Inoculantes-e-seus-efeitos-sobre-as-plantas.pdf?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em 28/01/2025.
PATEL, V. K et al. **Characterization of Seven Species of Cyanobacteria for High-Quality Biomass Production.** Arabian Journal for Science and Engineering, v. 43, n. 1, p. 109–121, 2017.

PATHAK, J et al. **Cyanobacterial Secondary Metabolite *Scytonemin*: A Potential Photoprotective and Pharmaceutical Compound**. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, p. 1-15, 2019.

PRASANNA, R. et al. **Cyanobacterial inoculation in rice crop: growth and yield enhancement**. European Journal of Soil Biology, v. 58, p. 48–56, 2013.

PERES, L. E. P. **Metabolismo secundário**. 1. ed. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.

PEREIRA, H et al. **Feijão**. Disponível em: < https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/cultivares/preto#:~:text=A%20cultivar%20Ouro%20Negro%20%C3%A9,de%20altas%20temperaturas%20e%20umidade..>. Acesso em 21/11/2024.

PINOTTI, M. H. P; SEGATO, R. **Cianobactérias: importância econômica**. Semina, v. 12, n. 4, p. 24S-280, dez, 1991.

PIRTTILÄ, A. M. et al. **Biofertilizers and Biocontrol Agents for Agriculture**. Microorganisms, v. 9, 2021.

PRIYA H. et al. **Influence of cyanobacterial inoculation on the culturable microbiome and growth of rice**. Microbiological Research, v. 171, p. 78–89, 2015.

RADMANN, E. B; FACHINELLO, J. C; PETERS, J. A. **Efeito de auxinas e condições de cultivo no enraizamento in vitro de porta-enxertos de macieira 'm-9'.** Rev. Bras. Frutic., v. 24, n. 3, p. 624-628, 2002.

RIBEIRO, M. S. F. **Dinâmica de cianobactérias e a detecção molecular de genes produtores de cianotoxinas na represa Billings**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biologia química) - Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2018.

ROSSI, F.; DE PHILIPPIS. R. **Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats**. Life, v. 5, p. 1218–1238, 2015.

SAFAFAR, H et al. **Carotenoids, phenolic compounds and tocopherols contribute to the antioxidative properties of some microalgae species grown on industrial wastewater**. Marine Drugs, v. 13, n. 12, p. 7339-7356, 2015.

SAHU, D; PRIYADARSHANI, I; RATH, B. **Cyanobacteria as potential biofertilizer**. CIBTech J. Microbiol., v. 1, p. 20-26, 2012.

SALVADOR, C. A; **PEREIRA, J. R. Prognóstico agropecuário – Feijão 2021/2022**. Secretaria da Agricultura do Paraná - DERAL, v. 13, n. 36, 2021.
SÁNCHEZ-BARACALDO, P. **Origin of marine planktonic cyanobacteria**. Sci. Rep., v.5, p.17418, 2015.

SHAHWAR, D. et al. **Role of Microbial Inoculants as Biofertilizers for Improving Crop Productivity**. Frontiers in Plant Science, 2023.

SCAGLIONI, P.T et al. ***Nannochloropsis sp*. and *Spirulina sp*. as a Source of Antifungal Compounds to Mitigate Contamination by Fusarium graminearum Species Complex**. Current Microbiology, v. 76, n.8, p. 930-938, 2019.

SINGH, J. S et al., **Cyanobacteria: A precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability**. Frontiers in Microbiology, v. 7, p. 529, 2016.

SINGH, R et al. **Uncovering potential applications of cyanobacteria and algal metabolites in biology, agriculture and medicine: Current status and future prospects**. Frontiers in Microbiology, v. 8, p. 1–37, apr. 2017.

SOUZA, M. M et al. **Avaliação da atividade antifúngica de extratos fenólicos de cebola, farelo de arroz e microalga *Chlorella phyrenoidosa*.** Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 30, n. 3, p. 680-685, 2010.

SOUZA, W. R. **Potencial de cianobactérias cultivadas em meio suplementado com vinhaça para produção de biodiesel**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biologia na Agricultura e no Ambiente) -Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

STANGARLIN, J. R et al. **A defesa vegetal contra fitopatógenos**. Scientia Agraria Paranaensis, v. 10, n. 1, p. 18, 2011.

STIRK, W. A. et al. **Cytokinin-and auxin-like activity in Cyanophyta and microalgae**. Journal of Applied phycology, v. 14, p. 215-221, 2002.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artemed, 2017.

TELLES, A. C; KUPSKI, L; FURLONG, E. B. **Phenolic compound in beans as protection against mycotoxins**. Food Chemistry, v. 214, p. 293–299, jan, 2017.

VINCENT, W. F. **Cyanobacteria**. In: Protists, bacteria and Fungi, Planktonic and attached. p. 226–232, 2009.

VINOGRADOVA, O. N. **Representatives of Stigonematales in the Flora of Ukraine: Diversity, Ecology, and Taxonomic Position**. International Journal on Algae, v. 18, n. 1, p. 67-80, 2016.

WANDER, A. E. **Socioeconomic aspects of common beans production, trade and consumption**. In: CAMPOS-VEGA, R; BASSINELLO, P.Z; OOMAH, B. D. Phaseolus vulgaris: Cultivars, production and uses. New York: Nova Science Publishers, Chapter 3, p. 71-87, 2018.

WANG, M. et al. **PGPR-mediated Enhancement of Soil Nutrients and Plant Performance**. npj Sustainable Agriculture, 2026.

WHITTON, B. A; POTTS, M. **The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space (2nd ed.)**. Springer Science & Business Media, 2012.

WU, L. C. et al. **Antioxidant and antiproliferative activities of *Spirulina* and *Chlorella* water extracts**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 53, n. 10, p. 4207-4212, 2005.

ZHANG, X. et al. **Biofertilizers Enhance Soil Fertility and Crop Yields**. Agronomy, v. 15, 2025.

ZEHR, J.P. **Nitrogen fixation by marine cyanobacteria**. Trends Microbiol., v.19, p. 162–173, 2011.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Artigo - Elaborado conforme a norma NBR 6022	
Título do artigo:	AVALIAÇÃO DE *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* COMO BIOINSUMO NA NUTRIÇÃO DE FEIJOEIRO
Autores:	Samantha Naomi Monfredini Alencar Maria Adelina Américo Vulalo Castigo Danilo José Machado de Abreu Carlos Godinho de Abreu Caio Isaamu Somiza Victor Satler Pylro Whasley Ferreira Duarte

ARTIGO

AVALIAÇÃO DE *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* COMO BIOINSUMO NA NUTRIÇÃO DE FEIJOEIRO

EVALUATION OF *PSEUDOALLINOSTOC SOLI* AS A BIOINPUT IN COMMON BEAN NUTRITION[1]

Samantha Naomi Monfredini Alencar
https://orcid.org/0000-0003-2798-2959

Maria Adelina Américo Vulalo Castigo
https://orcid.org/0000-0003-4840-068X

Danilo José Machado de Abreu
https://orcid.org/0000-0002-6165-4361

Carlos Godinho de Abreu
https://orcid.org/0000-0001-6735-8283

Caio Isaamu Somiza
https://orcid.org/0009-0009-4695-9704

Victor Satler Pylro
https://orcid.org/0000-0003-2154-9150

Whasley Ferreira Duarte
https://orcid.org/0000-0002-1027-588X

Resumo: As cianobactérias do gênero *Nostoc* apresentam potencial para uso como biofertilizantes devido à sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e produzir metabólitos de interesse agrícola. Assim, este estudo teve como objetivo selecionar uma linhagem de *Nostoc* com potencial biotecnológico e avaliar seu efeito biofertilizante no cultivo do feijoeiro Ouro Negro. Nesse contexto, cultivares como o feijão preto Ouro Negro (Honduras 35) podem se beneficiar da aplicação de biofertilizantes microbianos, potencializando o crescimento das plantas e a produtividade da cultura. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo realizar a caracterização fisiológica comparativa de cinco linhagens de *Nostoc* spp., visando selecionar a linhagem com maior potencial biotecnológico, bem como avaliar o efeito biofertilizante da linhagem selecionada no cultivo do feijoeiro Ouro Negro. Na primeira etapa, foram analisados o crescimento da biomassa (absorbância e peso seco), a concentração de clorofila *a*, produção de EPS e a atividade nitrogenase. Na segunda etapa, na etapa experimental em casa de vegetação, a biomassa da linhagem selecionada foi cultivada em meio $BG11_0$ sob condições controladas e aplicada ao feijoeiro a cada sete dias, após o surgimento da primeira trifoliada. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos

(NF, F e N) e oito repetições. Foram avaliados parâmetros biométricos, pigmentos foliares, produtividade e atributos microbiológicos do solo. A linhagem UFLA 37 apresentou os maiores valores de clorofila *a* (3,88 µg.mL^{-1}) e absorbância média (A_{680} = 3,54), indicando maior eficiência fotossintética e crescimento superior em relação às demais linhagens. Também apresentou elevada atividade nitrogenase (94,84±76,16 nmol N_2.g^{-1} ms.h^{-1}) e produção consistente de EPS (10 mg a partir de 220 mg de biomassa), sendo selecionada com base no conjunto dos parâmetros fisiológicos avaliados. A avaliação agronômica evidenciou que a aplicação da biomassa, especialmente quando associada ao fertilizante comercial, promoveu maior crescimento vegetativo do feijoeiro, refletido em incrementos na altura das plantas (14,44 cm), diâmetro do caule (4,25 cm), número de folhas (6,25) e comprimento radicular (38,33±19,14 cm), além de maior população microbiana do solo (9,80×10^5 UFC). Em relação à produtividade, a associação entre biomassa e fertilizante comercial favoreceu a formação de vagens (11,80), enquanto o fertilizante comercial de forma isolada contribuiu de maneira mais eficiente para o enchimento dos grãos (15,31 g), evidenciando efeito complementar entre os tratamentos.
De modo geral, os resultados indicam que a biomassa de *Nostoc* atua como biofertilizante complementar, contribuindo para o crescimento vegetativo, a formação de vagens e a melhoria da qualidade biológica do solo quando integrada à fertilização comercial. Esses achados reforçam o potencial da linhagem *Nostoc* UFLA 37 como ferramenta biotecnológica para o manejo integrado de nutrientes e para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Palavras-chave: biofertilizantes; cianobactéria, sustentabilidade; fixação biológica de nitrogênio.

Abstract: Cyanobacteria of the genus *Nostoc* have potential for use as biofertilizers due to their ability to fix atmospheric nitrogen and produce metabolites of agricultural interest. Therefore, this study aimed to select a *Nostoc* strain with biotechnological potential and evaluate its biofertilizing effect on the cultivation of Ouro Negro common bean. In this context, cultivars such as the black bean Ouro Negro (Honduras 35) may benefit from the application of microbial biofertilizers, enhancing plant growth and crop productivity. Thus, the present study aimed to perform a comparative physiological characterization of five *Nostoc* spp. strains in order to select the strain with the greatest biotechnological potential, as well as to evaluate the biofertilizing effect of the selected strain on the cultivation of Ouro Negro common bean. In the first stage, biomass growth (absorbance and dry weight), chlorophyll *a* concentration, exopolysaccharide (EPS) production, and nitrogenase activity were evaluated. In the second stage, under greenhouse conditions, the biomass of the selected strain was cultivated in BG110 medium under controlled conditions and applied to bean plants every seven days after the emergence of the first trifoliate leaf. The experiment was conducted in a completely randomized design with three treatments (NF, F, and N) and eight replicates. Biometric parameters, leaf pigments, crop productivity, and soil microbiological attributes were evaluated. Strain UFLA 37 exhibited the highest chlorophyll *a* concentration (3.88 µg mL^{-1}) and mean absorbance (A680 = 3.54), indicating greater photosynthetic efficiency and superior growth compared to the other strains. It also showed high nitrogenase activity (94.84 ± 76.16 nmol N_2 g^{-1} DW h^{-1}) and consistent EPS production (10 mg from 220 mg of biomass), being selected based on the overall physiological parameters evaluated. Agronomic assessment demonstrated that biomass application, particularly when combined with commercial fertilizer, promoted greater vegetative growth of common bean plants, reflected by increases in plant height (14.44 cm), stem diameter (4.25 mm), number of leaves (6.25), and root length (38.33 ± 19.14 cm), as well

as a higher soil microbial population (9.80×10^5 CFU). Regarding productivity, the combination of biomass and commercial fertilizer favored pod formation (11.80 pods per plant), whereas commercial fertilizer applied alone contributed more efficiently to grain filling (15.31 g), highlighting a complementary effect between the treatments. Overall, the results indicate that *Nostoc* biomass acts as a complementary biofertilizer, contributing to vegetative growth, pod formation, and improvement of soil biological quality when integrated with commercial fertilization. These findings reinforce the potential of strain *Pseudoallinostoc soli* UFLA 37 as a biotechnological tool for integrated nutrient management and the development of more sustainable agricultural systems.

Keywords: biofertilizers; cyanobacteria; sustainability; biological nitrogen fixation.

[1] Artigo científico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola, área de concentração em Microbiologia Agrícola.

1 INTRODUÇÃO

Biofertilizantes têm ganhado destaque na agricultura moderna como alternativas sustentáveis ao uso intensivo de insumos químicos. No Brasil, esses produtos são regulamentados pelo Lei nº 15.070/2024, que estabelece diretrizes para produção, registro e utilização de bioinsumos na agropecuária. Os biofertilizantes consistem na inoculação de microrganismos benéficos tanto para planta quanto para o solo, auxiliando no fornecimento de nutrientes, promovendo o crescimento vegetal e regulando a dinâmica do solo por meio de diferentes atividades metabólicas (Chittapun et al., 2018). Nesse cenário, o mercado de bioinsumos no Brasil tem apresentado crescimento expressivo, impulsionado pela demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis.

O uso de microrganismos com potencial agrícola tem se consolidado como uma estratégia promissora para aumentar a eficiência produtiva aliada à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Esses microrganismos podem atuar na fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, produção de substâncias promotoras de crescimento e melhoria da estrutura do solo, desempenhando papel fundamental na manutenção da fertilidade e da saúde do sistema produtivo.

Entre esses microrganismos, destacam-se as microalgas e cianobactérias, amplamente estudadas devido ao seu potencial biotecnológico. Produtos comerciais, frequentemente formulados à base de macroalgas, são utilizados na agricultura; no entanto, muitos são obtidos por processos extrativistas e apresentam composição variável, o que dificulta sua padronização e regulamentação. Nesse sentido, o desenvolvimento de bioinsumos a partir da biodiversidade brasileira, incluindo cianobactérias, representa uma alternativa estratégica e sustentável.

As cianobactérias são microrganismos procariontes e autotróficos, que podem ser encontrados nas formas unicelular, colonial ou filamentosa. Frequentemente apresentam mucilagem ao redor das células, uma massa gelatinosa cuja composição varia conforme as condições ambientais (Whitton; Potts, 2012). Especificamente, cianobactérias do gênero *Nostoc* spp. têm ganhado destaque na agricultura sustentável devido à sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e produzir compostos bioativos que promovem o crescimento das plantas e melhoram a qualidade do solo (Kaushik, 2014). Além disso, apresentam heterócitos, células especializadas capazes de assimilar o nitrogênio atmosférico e convertê-lo em amônia, um nutriente essencial para as plantas (Nicoletti, 2022). Essa característica torna as cianobactérias, um microrganismo promissor para uso na agricultura, especialmente em

sistemas agrícolas que buscam reduzir a dependência de fertilizantes químicos e adotar práticas mais sustentáveis.

Diversos estudos têm demonstrado o potencial das cianobactérias como biofertilizantes em diferentes culturas agrícolas. Hernández-Reyes et al (2019) observaram, na cultura do milho, efeitos positivos da aplicação de cianobactérias sobre o crescimento das plantas, número de folhas e aumento do teor de proteínas nos grãos, além de melhorias nas características do solo. De forma semelhante, Vidal; Benítez e Vanegas (2018), verificaram que a inoculação de diferentes espécies de cianobactérias (*Gloeocapsa* sp. e *Oscillatoria anfíbia*) nas culturas do arroz, milho e feijão promoveram aumento no crescimento das plantas de arroz, evidenciando o potencial como alternativa à fertilização química. Esses resultados reforçam a aplicabilidade desses microrganismos em diferentes sistemas produtivos.

No Brasil, o feijão comum (*Phaseolus* vulgaris) possui grande relevância econômica e social, amplamente consumido devido ao seu valor nutricional e à acessibilidade (CNA, 2024). O país está entre os maiores compradores e consumidores de feijão, e também entre os três maiores produtores de feijão do mundo (FAO, 2024). Diversos tipos de feijão são produzidos no país, como o feijão comum, preto, branco, vermelho, fradinho, rajado, manteiga, entre outros (MEDINA, 2021). Entre as variedades cultivadas, destaca-se o feijão preto Ouro Negro, introduzido pela Embrapa em 1991, conhecido por sua alta produtividade, resistência a doenças e adaptação às condições climáticas brasileiras (Alzate-Marin et al., 2003; Pereira et al., 2023).

O feijão apresenta sistema radicular relativamente superficial, o que torna a cultura dependente de boas condições de fertilidade do solo para seu desenvolvimento adequado. Dessa forma, o uso de fertilizantes químicos no cultivo de feijão é uma prática comum para suprir a planta com nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, sendo o manejo adequado fundamental para obtenção de alta produtividade. No entanto, o manejo intensivo com fertilizantes químicos, frequentemente adotado na cultura do feijão, pode resultar em impactos negativos, como desequilíbrios nutricionais, contaminação do solo e redução da biodiversidade microbiana (De Carvalho; Silveira, 2023).

Nesse contexto, a substituição ou complementação dos fertilizantes químicos por biofertilizantes à base de cianobactérias surge como uma alternativa sustentável para mitigar esses impactos uma vez que esses microrganismos podem atuar tanto no fornecimento de nutrientes, especialmente nitrogênio via fixação biológica, quanto na produção de compostos com efeito bioestimulante.

Considerando a relevância da agricultura brasileira, especialmente da cultura do feijão, o uso de biofertilizantes à base de cianobactérias pode trazer diversos benefícios, além de

apresentar potencial de aceitação no mercado nacional como alternativa aos produtos importados.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo realizar a caracterização fisiológica comparativa de cinco linhagens de *Nostoc* spp., visando selecionar a linhagem com maior potencial biotecnológico, bem como avaliar o seu uso como biofertilizante na cultura do feijão, investigando seu potencial em promover o crescimento das plantas, a partir do monitoramento da altura e da produtividade dos grãos. Além disso, busca-se analisar se a aplicação do *Nostoc* sp. pode promover alterações na qualidade de nutrientes do solo e nos grãos de feijão, melhorando a disponibilidade de nutrientes essenciais para o feijoeiro, bem como verificar possíveis alterações na microbiota do solo, contribuindo para uma melhor compreensão dos efeitos microbiológicos e sustentáveis do uso de biofertilizantes na agricultura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Conduções experimentais

Cinco linhagens de *Nostoc spp.* (UFLA 11, UFLA 26, UFLA 37, UFLA 27 e UFLA 19) foram obtidas da coleção de culturas do setor de Botânica do Departamento de Biologia (DBI) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As análises de pré-seleção, preparo da biomassa para aplicação no feijoeiro, bem como análises de caracterização dos pigmentos foliares e dos atributos microbiológicos dos substratos foram realizados no setor de Microbiologia Agrícola, também vinculado ao DBI da UFLA.

As sementes de Feijão preto, cultivar Ouro Negro (Embrapa) foram obtidas no Departamento de Fitopatologia da UFLA, local onde também se encontra a casa de vegetação na qual o experimento foi conduzido.

2.2 Obtenção e cultivo inicial da biomassa

As cinco linhagens de *Nostoc* spp. foram cultivadas em placas contendo meio BG-11_0 (sem nitrato) (Allen, 1968, com modificações). A ausência de fonte combinada de nitrogênio no meio tem como objetivo induzir a formação de heterócitos e estimular a fixação biológica de nitrogênio. Inicialmente, 0,06 g de biomassa (peso úmido) foram utilizados como inóculo e transferidos para tubos de ensaio contendo 17 mL de meio de cultura BG-11_0, onde permaneceram por 30 dias. O meio BG-110 foi preparado a partir de soluções estoque, resultando nas seguintes concentrações finais por litro: 0,04 g de K_2HPO_4, 0,075 g de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0,036 g de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, 0,006 g de ácido cítrico, 0,006 g de citrato de amônio férrico, 0,001 g de Na_2EDTA e 0,02 g de Na_2CO_3. Adicionalmente, foi adicionado 1 mL de solução de micronutrientes por litro de meio, composta por H_3BO_3 (2,86 g L^{-1}), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (1,81 g L^{-1}), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (0,222 g L^{-1}), $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ (0,39 g L^{-1}), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (0,079 g L^{-1}) e $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (0,049 g L^{-1}). O volume final do meio foi ajustado para 1 L com água de grau biologia molecular, conforme descrito por Allen (1968), com modificações.

Após este período iniciou-se o cultivo de forma escalonada. O cultivo escalonado foi realizado com o objetivo de aumentar gradativamente a biomassa para posterior utilização nas análises fisiológicas e nos experimentos em casa de vegetação. A biomassa cultivada foi centrifugada a 2.625 g por 5 minutos para remoção do meio de cultura, e em seguida, transferida para frascos Erlenmeyer contendo 100 mL de meio BG-11_0. Posteriormente, a cada 15 dias, o

mesmo procedimento foi realizado, transferindo-se a biomassa sucessivamente para volumes maiores de meio de cultura (200 mL, 500 mL, 1 L e 1,5 L). As culturas foram mantidas em incubadora BOD, sob fotoperíodo de 12h/12h e temperatura controlada a 23 ºC, sendo conduzidas em triplicata. Além disso, todas as culturas continham o antifúngico nistatina (0,0002%) para evitar contaminação fúngica.

2.3 Pré-seleção da linhagem a ser utilizada

A escolha da linhagem a ser utilizada para o desenvolvimento do projeto se deu por meio da avaliação de fatores como crescimento da biomassa, produção de exopolissacarídeos e atividade nitrogenase.

2.3.1 Crescimento da biomassa

O crescimento da biomassa foi avaliado por meio da absorbância em espectrofotômetro, de acordo com Diao e Yang (2014), e pela estimativa do peso seco das células conforme metodologia descrita por Su et al. (2008). A determinação do peso seco foi realizada para complementar a estimativa indireta de crescimento obtida por absorbância. Para análise de absorbância, a biomassa cultivada em um tubo de ensaio por 15 dias foi homogeneizada e uma alíquota de 3 mL foi transferida para cubeta, sendo a absorbância determinada a 680 nm (A_{680}) para estimar o crescimento celular. Para determinação do peso seco da biomassa, utilizou-se o papel filtro Whatman GF/C (11 µm de tamanho de poro e 125mm de diâmetro), previamente pesado. Em seguida, foram filtrados 15-16 mL da cultura contendo biomassa por meio da bomba a vácuo. Posteriormente, o filtro foi levado à estufa a 40 ºC até atingir peso constante.

A concentração de clorofila *a* também foi determinada por espectrofotometria com leituras a 666 e 653 nm após extração de 0,1 g de biomassa cianobacteriana em 5 mL de metanol a 96%, conforme Mansouri, Talebizadeh e Ansari (2019). Os resultados foram expressos em $\mu g.mL^{-1}$ de extrato e calculados utilizando a Equação 1 (Dere et al. 1998).

Figura 1 – Equação da clorofila *a*

$$Clorofila\ a = (15{,}65 \times A_{666}) - (7{,}340 \times A_{653})$$

Fonte: Da autora (2026)

2.3.2 Produção de exopolissacarídeos (EPS)

A produção de exopolissacarídeos (EPS) foi avaliada após 15 dias de cultivo, de acordo com Barbosa et al (2004). Para isso, as amostras foram centrifugadas a 4.102 g por 20 minutos a 4 ºC para separação da biomassa do sobrenadante contendo os EPS. Em seguida, foram adicionados dois volumes de etanol absoluto (1:2, v/v) ao sobrenadante, sendo as amostras mantidos a - 4 ºC por 24 horas para precipitação dos exopolissacarídeos. Posteriormente, as amostras foram novamente centrifugadas a 4.102 g por 20 minutos a 4 ºC para separação do precipitado. O precipitado contendo os EPS foi transferido para pratos de alumínio descartáveis previamente pesados e levado à estufa a 40 ºC até o peso constante. Após esse processo, realizou-se a pesagem do material para determinação da produção de EPS, expressa em $g.L^{-1}$ por diferença de massa.

2.3.3 Determinação da atividade nitrogenase por redução de acetileno (ARA) e cálculo da taxa de fixação biológica de nitrogênio (FBN)

A atividade da nitrogenase foi avaliada pelo método de redução de acetileno (ARA) (SHINNER et al., 1995 - adaptado) para estimar indiretamente a fixação biológica de nitrogênio (FBN). Para isso, alíquotas de 10 mL da cultura contendo inicialmente 0,05g de biomassa de cianobactérias foram incubadas por 15 dias em frascos de vidro tipo vial (20 mL) hermeticamente vedados. Foram utilizadas três repetições por linhagem, além dos frascos controles sem inoculação. Após o período de cultivo, 1 mL do *headspace* de cada frasco foi retirado e substituído pelo mesmo volume de acetileno, utilizando seringa gas-tight (Sigma-Aldrich®), de modo a saturar a enzima nitrogenase e promover a máxima atividade de redução do acetileno. Os frascos foram incubados por 1 h em temperatura ambiente. Após o período de incubação, 1 ml da atmosfera interna dos frascos foi coletado e injetado em cromatógrafo a gás equipado com detector de ionização de chama (FID) e coluna RT-QPlot para determinação da concentração de etileno produzido. As temperaturas do cromatógrafo foram mantidas em 200ºC no injetor no detector. O etileno puro foi utilizado como padrão para a quantificação. A concentração de etileno produzida foi calculada conforme a Equação 2:

Figura 2 – Cálculo da concentração de etileno em nanomols por grama de massa por hora de incubação

$$nmol\ etileno.g^{-1}msh^{-1} = \frac{(A-C).V.P.100}{MA.ml.R.T.t.\%ms}$$

Fonte: Da autora (2026)

Onde A é a quantidade de etileno obtido na amostra após a incubação (nl), C é a quantidade de etileno nos frascos não incubados, V é o volume do *headspace*, P é a pressão do ar sob condições padrão (101300Pa), MA é a massa inicial da amostra (g), ml é a quantidade de amostra injetada no cromatógrafo, R é a constante dos gases, T é a temperatura de incubação, t é o tempo de incubação e %ms é o fator de matéria seca.

As taxas de FBN foram estimadas a partir da produção de etileno utilizando a relação estequiométrica teórica 3:1, que considera que três mols de acetileno reduzidos correspondem à fixação de um mol de N_2, conforme descrito na Equação 3.

Figura 3 – Cálculo da concentração de N fixado em nmol $N_2.g^{-1}$ ms.h^{-1}.

$$N_2 fixado = \frac{nmol\ etileno\ .g^{-1}ms.h^{-1}}{3} \times 28$$

Fonte: Da autora (2026)

2.4 Preparo da biomassa para aplicação como biofertilizante

2.4.1 Cultivo da biomassa de cianobactéria

Para a obtenção da biomassa destinada à aplicação como biofertilizante, a cianobactéria UFLA 37, previamente isolada, foi cultivada em meio BG-11_0 com nistatina para controle de contaminações fúngicas. O cultivo foi realizado em frascos Erlenmeyer de 2 L, contendo 1,5 L do meio de cultura previamente autoclavado. A renovação do meio de cultura foi realizada a cada 30 dias. Para isso, a biomassa foi transferida para tubos Falcon de 50 mL e centrifugada a 2.625 g por 5 minutos para remoção do meio de cultura. Em seguida, a biomassa foi transferida para novo meio de cultura estéril. As culturas foram mantidas em incubadora tipo BOD, sob temperatura constante de 23 ºC e fotoperíodo de 12/12 horas.

2.4.2 Preparação da suspensão de biomassa para aplicação nas plantas

A biomassa da cianobactéria cultivada foi centrifugada a 2.625 g por 5 minutos, seguida de duas lavagens com água destilada estéril, com o objetivo de remover completamente o meio de cultura. Após as lavagens, a biomassa foi pesada, sendo utilizadas alíquotas de 5g, que foram transferidas para tubos Falcon. Em seguida, foram adicionados 40 mL de água, formando uma suspensão de biomassa utilizada para irrigação das plantas.

2.5 Potencial biofertilizante da biomassa

2.5.1 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por três tratamentos: biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura (NF), dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria (F) e somente aplicação de biomassa de cianobactéria (N). Ressalta-se que, no tratamento NF, não houve substituição parcial do fertilizante, sendo a biomassa aplicada de forma complementar, pois a adoção desse delineamento teve como objetivo avaliar o efeito complementar da biomassa de cianobactéria, e não sua substituição ao fertilizante mineral. Cada tratamento contou com oito repetições. A unidade experimental foi constituída por um vaso contendo duas plantas, totalizando oito vasos por tratamento e 24 vasos no experimento. Os vasos utilizados apresentavam capacidade para 5 kg e foram preenchidos com uma mistura de terra, areia e substrato comercial na proporção de 2:1:2. Quinze dias antes da semeadura, todos os vasos receberam 1,32g de calcário por vaso para correção da acidez do solo. A irrigação foi realizada com água conforme a necessidade das plantas ao longo do experimento. A caracterização química inicial do solo foi realizada por meio de análise de fertilidade total utilizando extrator Mehlich, e os resultados são apresentados na Tabela 2 que segue abaixo. Com base nessa análise, foi calculada a quantidade necessária de nutrientes para correção da fertilidade do solo, sendo realizada a aplicação de fertilizante comercial. As aplicações da biomassa foram realizadas a cada sete dias, iniciando-se aos 9 dias após a semeadura (9 dias após a semeadura - DAS) e até a senescência da planta. Em cada aplicação, foram adicionados 5g de biomassa por vaso nos tratamentos NF e N, distribuídos aleatoriamente. Durante todo o período experimental, plantas espontâneas foram removidas para evitar competição por nutrientes com as plantas em estudo.

Tabela 2 – Composição química do solo inicial utilizado para o cultivo

(Continua)

Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
pH (em KCl)	6,0	-
Fósforo (P)	228,18	mg/dm³

Tabela 2 – Composição química do solo inicial utilizado para o cultivo

(Conclusão)

Parâmetro	Valor	Unidade
Potássio (K)	17,08	mg/dm³
Cálcio (Ca)	0,69	cmolc/dm³
Magnésio (Mg)	0,66	cmolc/dm³
Alumínio (Al)	0,11	cmolc/dm³
H + Al	2,20	cmolc/dm³
SB (Soma de Bases)	1,94	cmolc/dm³
CTC (t) Efetiva	2,05	cmolc/dm³
CTC (T) a pH 7	4,14	cmolc/dm³
V (Saturação por bases)	46,74	%
m (Saturação por Al)	5,37	%
Matéria Orgânica (MO)	5,86	dag/kg
P-rem (P remanescente)	34,30	mg/L
Zinco (Zn)	3,90	mg/dm³
Ferro (Fe)	95,00	mg/dm³
Manganês (Mn)	24,90	mg/dm³
Cobre (Cu)	2,15	mg/dm³
Boro (B)	0,35	mg/dm³
Enxofre (S)	49,70	mg/dm³

Fonte: Elaborado pela autora com base na análise realizadas no Laboratório de Análises de Solo do Departamento de Ciência dos Solos – DCS/UFLA (2026)

2.6 Análise biométrica do feijoeiro

Os parâmetros de crescimento do feijoeiro, incluindo altura das plantas, diâmetro do caule e número de folhas foram avaliados a cada sete dias. A altura das plantas foi determinada com auxílio de régua milimétrica e o diâmetro do caule foi medido utilizando paquímetro digital, além da contagem de número de folhas por planta. No estádio fenológico R6 (59 DAS) foram coletadas três plantas inteiras por tratamento, selecionadas aleatoriamente, para avaliação do

comprimento da maior raiz, número de folhas e das massas fresca e seca de folhas, caules e raízes. Posteriormente, as massas de raízes, folhas e caules foram somadas para determinação da massa total de cada planta. Para a determinação da massa seca, o material vegetal fresco foi acondicionado em sacos de papel e mantido em estufa a 60 ± 5 °C até atingir peso constante (Santana et al., 2018). No estádio R9 (98 DAS) foi realizada a colheita das plantas remanescentes para avaliação da produtividade. Foram mensurados comprimento de legumes, número e peso de legumes e grãos por planta.

2.7 Caracterização dos pigmentos foliares

Amostras foliares foram coletadas ao longo do ciclo de cultivo do feijoeiro, nos estádios V3 (17 DAS), R5 (51 DAS) e R8 (74 DAS). Folhas de duas plantas por tratamento foram coletadas, acondicionadas individualmente em envelopes de papel alumínio, imediatamente armazenadas em nitrogênio líquido e posteriormente freezer -80 ºC até o momento das análises.

Para determinação dos teores de clorofilas e carotenoides, foram pesados 0,1 g de tecido foliar, posteriormente transferidos para frascos âmbar contendo 10 mL de acetona a 80% (v/v). Após 48 horas de extração, foram realizadas leituras espectrofotométricas nos comprimentos de onda de 646,8 e 663,2 ηm para determinação das clorofilas *a* e *b*, e a 470 ηm para determinação dos carotenoides, conforme descrito por Lichtenthaler e Buschmann (2001).

2.8 Atributos microbiológicos dos substratos

Para as análises do microbioma do solo, foram realizadas dez coletas ao longo do experimento, incluindo a amostra de solo inicial. Em cada coleta, as amostras foram obtidas em triplicata, de forma aleatória, a uma profundidade de 0 a 10 cm para formação de uma amostra composta representativa de cada sistema. A primeira coleta correspondeu ao solo inicial, realizada antes da semeadura. Após a semeadura, as coletas passaram a ser realizadas a cada sete dias, iniciando aos 21 dias após a semeadura (21 DAS) e seguindo até o final do experimento, quando as plantas iniciaram o processo de senescência (78 DAS). Em cada coleta, as amostras de solo foram homogeneizadas, e alíquotas de 10 g de solo foram utilizadas para plaqueamento em meio ágar nutriente e em BG-11_0.

2.9 Avaliação da capacidade de solubilização de fosfato inorgânico por *Nostoc*

A capacidade de solubilização de fosfato inorgânico pela *Nostoc* foi avaliada *in vitro*, de acordo com a metodologia descrita por Santos et al. (2012), com modificações. Colônias isoladas de *Nostoc* foram inoculadas em meio de cultura BG-11_0 sólido, preparado sem adição de K_2HPO_4, com o objetivo de eliminar fontes solúveis de fósforo. Para manter a disponibilidade de potássio no meio, foi realizada suplementação com KCl (34,2 $mg \cdot L^{-1}$). Como fonte de fósforo insolúvel, utilizou-se fosfato de cálcio bibásico ($CaHPO_4$) (4 $g \cdot L^{-1}$), incorporado ao meio de cultura. Após a inoculação, as placas foram incubadas por 14 dias, em incubadora do tipo BOD, mantidas a temperatura constante de 23 ºC e sob fotoperíodo de 12/12 horas. A solubilização do fosfato foi evidenciada pela formação de uma zona clara ou halo translúcido ao redor das colônias, resultante da solubilização do $CaHPO_4$ presente no meio. O diâmetro da colônia e do halo foram medidos com auxílio de régua milimétrica. O Índice de Solubilização (IS) foi calculado pela razão entre o diâmetro médio total do halo de solubilização e o diâmetro médio da colônia, conforme proposto por Berraquero et al. (1976). O experimento foi conduzido em triplicata, sendo inoculadas três colônias isoladas por placa.

2.10. Identificação

2.10.1. Extração de DNA

As cinco linhagens de cianobactérias foram identificadas por meio de uma abordagem molecular, especificamente, utilizando sequenciamento de Sanger de um fragmento do gene 16S rRNA. Para isso, as cianobactérias foram cultivadas em placas contendo meio BG-11_0 durante 14 dias. A biomassa obtida (aproximadamente 1 mL de células) foi colocada em eppendorf´s esterilizados de 2 mL. O procedimento de extração foi realizado de forma manual conforme Fiore et al (2000), com algumas modificações.

2.10.2. Amplificação do DNA por reação em Cadeia Polimerase (PCR)

A reação de PCR para amplificação do gene 16S rRNA foi realizada utilizando primers 27F (5′-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3′) como primer direto e 23S30R (5′-CTTCGCCTCTGTGTGCCTAGGT-3′) como primer reverso (Turner et al., 1999). Esse par de primers foi selecionado por apresentar especificidade para cianobactérias, permitindo a amplificação da região do gene 16S rRNA associada ao espaçador interno transcrito (ITS 16S-23S), característica desse grupo. Dessa forma, sua utilização favorece a amplificação de

sequências de cianobactérias, reduzindo a amplificação de bactérias heterotróficas não alvo. A mistura de PCR inclui 0,5 µL da amostra total de DNA, 0,5 µL de cada primer (a uma concentração de 10 µM), 12,5 µL de GoTaq Green Master Mix (Promega) e 11 µL de água grau biologia molecular, obtendo um volume final de 25 µL. As condições de PCR são as seguintes: desnaturação inicial a 94 °C por 5 minutos, seguida de 35 ciclos de 45 segundos a 94 °C, 45 segundos a 61 °C e 3 minutos a 72 °C, com extensão final a 72 °C por 10 minutos. Os produtos de PCR foram visualizados em gel de agarose a 1,2% sob luz UV após coloração com GelRed, utilizando um transiluminador iBright (Invitrogen®) (Silva et al., 2013; Senthilraj et al., 2016). Para separação das duas bandas foi utilizado o kit Agarose Gel Extraction Kit (Cellco) conforme as especificações do fabricante. A segunda etapa de amplificação foi realizada por meio de PCR aninhada (nested PCR), estratégia na qual o produto da primeira reação é utilizado como molde em uma nova PCR com primers internos à região previamente amplificada. Esse procedimento promove aumento significativo na especificidade e sensibilidade da reação, minimizando amplificações inespecíficas e melhorando a detecção de sequências alvo em amostras com baixa concentração de DNA ou alta complexidade microbiana. No contexto deste estudo, a aplicação da nested PCR foi fundamental para a obtenção de amplicons mais específicos de cianobactérias, garantindo maior precisão na posterior identificação molecular. Assim, para nested PCR foram utilizados os Primers 27F e 1494R (TACGGCTACCTTGTTACGAC) com o produto de PCR da primeira rodada diluído a 1 ng/µL. As condições de PCR são as seguintes: desnaturação inicial a 94 °C por 5 minutos, seguida de 25 ciclos de 45 segundos a 94 °C, 45 segundos a 56 °C e 1 minuto e 30 segundos a 72 °C, com extensão final a 72 °C por 10 minutos.

2.10.3. Sequenciamento

Os produtos amplificados foram sequenciados pelo método de Sanger do fragmento do gene 16S rRNA. O sequenciamento de Sanger baseia-se na incorporação de dideoxinucleotídeos (ddNTPs) durante a síntese de DNA, resultando na interrupção da extensão da cadeia em posições específicas, o que permite a determinação da sequência nucleotídica com alta precisão. Esse método é amplamente utilizado para sequenciamento de fragmentos gênicos individuais, recomendado para análises de identificação molecular. Após o sequenciamento, as leituras forward e reverse foram inspecionadas visualmente e posteriormente montadas para gerar uma sequência de consenso usando o MEGA Software versão 11 (Tamura, et al., 2021). A sequência consenso resultante foi comparada com sequências de nucleotídeos depositadas no banco de dados GenBank RefSeq usando o algoritmo BLASTN.

2.11. Análises estatísticas dos dados

Os dados obtidos na pré-seleção da linhagem foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativo pelo teste F a um nível de significância de 0,05 ($p<0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Os dados agronômicos, incluindo as variáveis de crescimento e de produtividade avaliadas ao longo do ciclo de cultivo, foram analisados como parcelas subdivididas no tempo e submetidas ao teste F ($p<0,05$). Para os dados de pigmentos foliares, além das análises estatísticas descritas anteriormente, foi calculado o desvio padrão para avaliar a variação entre as repetições dentro de cada tratamento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

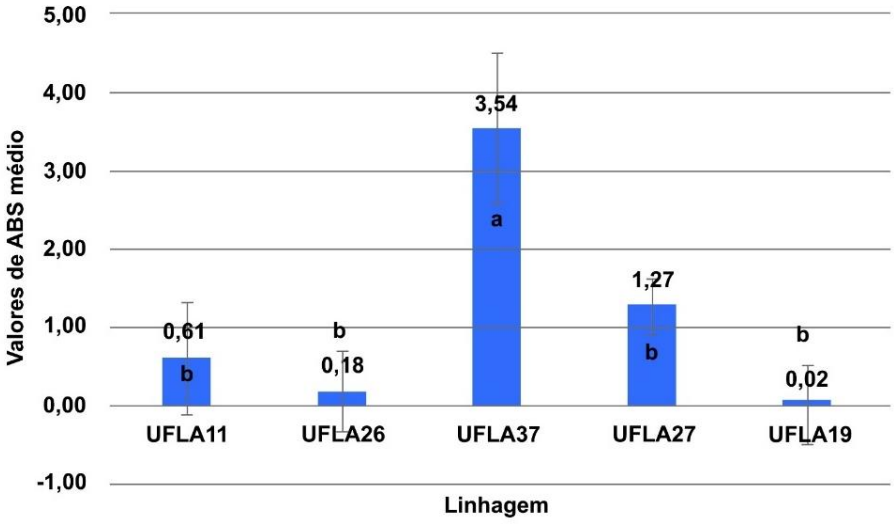
3.4 Pré-seleção da linhagem *Nostoc*

3.4.1 Avaliação do crescimento da biomassa por absorbância, peso seco e concentração de clorofila *a*

Na Figura 4 são apresentados valores médios de absorbância observados para as linhagens avaliadas. A análise de absorbância da biomassa é amplamente utilizada como um método indireto para estimar a densidade celular e a concentração de pigmentos fotossintéticos em culturas de microalgas e cianobactérias (Tiwari et al., 2025), sendo uma ferramenta útil na seleção de linhagens com maior potencial para aplicação biotecnológica.

O maior valor médio de absorbância foi observado na linhagem UFLA 37 (3,54), a qual apresentou diferença significativa ($p<0.05$) em relação às demais linhagens avaliadas. Valores mais elevados de absorbância geralmente indicam maior densidade celular e maior concentração de pigmentos fotossintéticos na cultura, refletindo maior atividade metabólica e potencial de crescimento da linhagem (Richmond; Hu, 2013; Debowski; Kazimierowicz; Zielinski, 2025; Cartin-Caballero et al., 2025.). Estudos recentes demonstram que a densidade óptica medida por espectrofotômetro pode ser utilizada como um método rápido para estimar biomassa de microalgas e cianobactérias, sendo amplamente aplicada em experimentos de crescimento e monitoramento de culturas (Fekete et al., 2024).

Figura 4 – Absorbância média de cada linhagem observada após 15 dias de cultivo



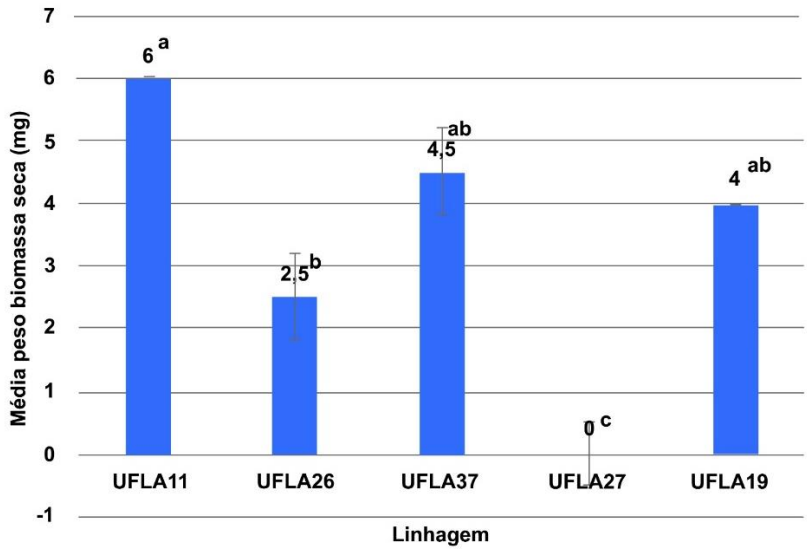
Letras iguais não apresentam diferença estatístico (*p=0,05*).

Fonte: Da autora (2026)

Os resultados da análise de peso seco da biomassa das linhagens de cianobactérias após 15 dias de cultivo são apresentados na Figura 5. A linhagem UFLA 11 apresentou maior acúmulo de biomassa seca (6 mg), seguida pelas linhagens UFLA 37 (4,5 mg) e UFLA 19 (4 mg). A UFLA 27 não apresentou produção mensurável de biomassa seca (0 mg), diferindo significativamente das demais linhagens avaliadas ($p<0.05$).

As variações dos valores de peso seco das biomassas observadas entre as linhagens podem estar relacionadas a diferenças na capacidade de crescimento de cada cepa sob as condições de cultivo utilizadas. Mesmo quando cultivadas em condições laboratoriais controladas, as cianobactérias podem apresentar diferentes taxas de crescimento e produtividade de biomassa, em função de características fisiológicas próprias e da adaptação de cada cepa às condições do meio de cultura (Yu; Jia; Dai, 2009; Mouga et al., 2024). Nesse contexto, o maior acúmulo de biomassa observado nas linhagens UFLA 11, UFLA 37 e UFLA 19 pode sugerir maior capacidade de crescimento dessas linhagens nas condições de cultivo avaliadas neste estudo. Por outro lado, o baixo acúmulo de biomassa observado na linhagem UFLA 27 pode indicar menor adaptação ao meio de cultura ou menor taxa de crescimento sob as condições experimentais utilizadas.

Figura 5 – Peso seco médio da biomassa (mg) produzida pelas linhagens de cianobactérias após 15 dias de cultivo em 100 mL de meio de cultura



Letras iguais não apresentam diferença estatístico ($p=0,05$).

Fonte: Da autora (2026)

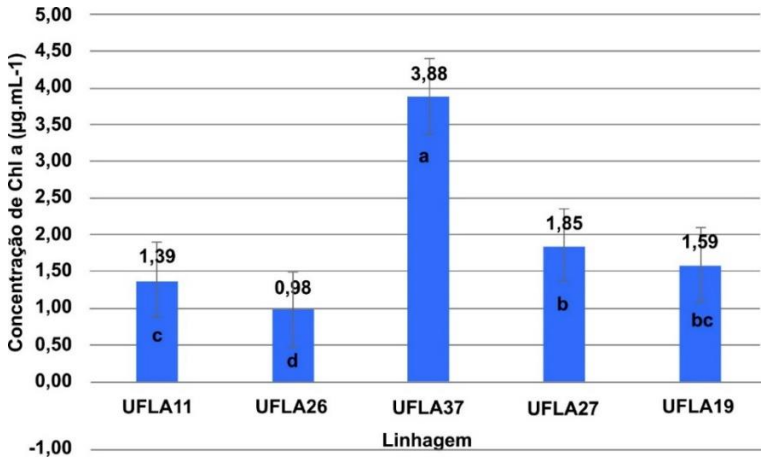
Na análise de concentração de clorofila *a*, observou-se que a UFLA 37 apresentou maior

concentração de clorofila *a* (3,88 µg.mL^{-1}), diferindo significamente das demais linhagens avaliadas ($p<0.05$) conforme apresentado na Figura 6. As linhagens UFLA 11, UFLA 27 e UFLA 19 apresentaram concentrações de clorofila *a* semelhantes (1,39, 1,85 e 1,59 µg.mL^{-1}, respectivamente) não apresentando diferenças significativas entre si ($p>0.05$). Por outro lado, a UFLA 26 apresentou menor concentração de clorofila *a* (0,98 µg.mL^{-1}), diferindo significativamente de todas as linhagens ($p<0.05$).

A clorofila *a* é o principal pigmento fotossintético das cianobactérias, e a sua quantidade está frequentemente associada à atividade fotossintética e à produtividade da biomassa, uma vez que esse pigmento desempenha papel central na assimilação de carbono e no funcionamento do aparato fotossintético (Sampaio, 2022; Zhang et al., 2025). Assim, linhagens que apresentam maiores concentrações desse pigmento tendem a apresentar maior capacidade de crescimento e adaptação em diferentes condições ambientais, característica importante para aplicações biotecnológicas e agrícolas.

Além disso, estudos têm demonstrado que cianobactérias com elevada atividade fotossintética podem contribuir para a melhoria da fertilidade do solo por meio de processos como fixação biológica de nitrogênio, produção de compostos bioativos e incremento da matéria orgânica do solo. Dessa forma, a maior concentração desse pigmento observada na linhagem UFLA 37 pode indicar maior potencial fotossintético quando comparada às demais linhagens avaliadas, podendo indicar maior capacidade de captação de luz e eficiência na produção de energia metabólica necessária para o crescimento celular (Paerl; Otten, 2013; Singh et al., 2016).

Figura 6 – Concentração de clorofila a (µg.mL-1) de cada linhagem observada após 15 dias de cultivo



Letras iguais não apresentam diferença estatístico ($p=0,05$)

Fonte: Da autora (2026)

A elevada absorbância observada para a UFLA 37 corrobora com os resultados obtidos para o teor de clorofila *a* (Figura 3), indicando maior conteúdo de pigmentos fotossintéticos nessa linhagem. Em organismos fotossintéticos, como cianobactérias e microalgas, pigmentos como clorofilas, carotenoides e ficobiliproteínas desempenham papel fundamental na captação de energia luminosa e sua transferência, contribuindo para maior eficiência fotossintética e crescimento celular (Pagels et al., 2021).

Já a comparação entre os resultados de peso seco da biomassa e concentração de clorofila *a* permite observar que maiores valores de biomassa não estiveram necessariamente associados a maiores concentrações do pigmento fotossintético, como pode ser observado no caso das linhagens UFLA 11 e UFLA 19. Embora essas linhagens tenham apresentado maior acúmulo de biomassa, as concentrações de clorofila *a* apresentaram próximas ao valor observado para a UFLA 27, que apresentou menor produção de biomassa seca.

Esse resultado evidencia que, a relação entre produção de biomassa e concentração de pigmentos fotossintéticos pode variar entre diferentes linhagens de cianobactérias. Em determinadas condições, algumas linhagens podem apresentar maior produção de clorofila *a* mesmo com menor crescimento celular, como uma forma de estratégia fisiológica associada à otimização da captação de luz e da eficiência fotossintética (Rosales Loaiza et al., 2016; Mansouri et al., 2019, Sampaio, 2022).

Com base nas análises anteriores, observa-se que a UFLA 37 se destacou por apresentar maiores valores de absorbância e de clorofila *a*, parâmetros fundamentais para a seleção de uma linhagem com maior potencial de crescimento de biomassa.

3.4.2 Fixação biológica de nitrogênio (FBN) estimada pelo ensaio de redução do acetileno (ARA)

Os resultados da FBN das linhagens avaliadas são apresentados na Tabela 3. Observa-se ampla variação nos valores obtidos, com médias variando de 5,19 a 196,83 nmol N_2 g^{-1} ms h^{-1}. A UFLA 27 apresentou maior valor médio de nitrogênio fixado (196,83 ± 341,00 nmol N_2 g^{-1} ms h^{-1}), seguida pela UFLA 37 (94,84 ± 76,16 nmol N_2 g^{-1} ms h^{-1}). Já a UFLA 11 apresentou o menor valor médio de nitrogênio fixado (5,19 ± 8,99 nmol N_2 g^{-1} ms h^{-1}).

A variabilidade observada entre as linhagens indica diferenças no potencial de fixação biológica de nitrogênio, mesmo dentro de um mesmo gênero ou ordem (Nawaz et al., 2025; El-Seedi et al., 2023). Além das diferenças entre linhagens, foram observados altos desvios-padrão entre repetições experimentais, especialmente na linhagem UFLA 27. Esse padrão é

frequentemente relatado em estudos que utilizam o ensaio de ARA para estimar a atividade da nitrogenase em cianobactérias (Addison et al., 2024; Xing; Liu; Zhang, 2023).

A atividade nitrogenase observada neste estudo apresentou valores de 63,82 a 196,83 nmol N_2 g^{-1} ms h^{-1}, dentro da faixa relatada para cianobactérias diazotróficas cultivadas em condições laboratoriais. Estudos com espécies da ordem Nostocales relatam taxas de atividade da nitrogenase que variaram, dependendo da linhagem e das condições de cultivo, entre 10 a 200 nmol N_2 g^{-1} ms h^{-1} (Esteves-Ferreira et al., 2017; Xing; Liu; Zhang, 2023). Essa ampla variação indica que diferenças fisiológicas entre isolados podem resultar em distintos potenciais de fixação de nitrogênio.

A FBN é catalisada pelo complexo enzimático nitrogenase, responsável pela redução do N_2 atmosférico a amônia. Esse processo requer grande quantidade de energia metabólica e fluxo contínuo de elétrons, geralmente provenientes de ferredoxinas ou flavodoxinas, tornando a atividade da enzima altamente dependente do metabolismo celular e das condições fisiológicas da cultura (Addison et al., 2024). Em cianobactérias, como espécies do gênero Nostoc, a fixação de nitrogênio ocorre principalmente em heterócitos, células especializadas para atividade da nitrogenase. No entanto, a frequência e o grau de diferenciação dessas células podem variar ao longo do crescimento da cultura, influenciando diretamente as taxas de fixação de N_2 observadas durante o experimento (Xing; Liu; Zhang, 2023; Liu et al., 2024). Além disso, a presença de pequenas fontes de nitrogênio no meio de cultivo, mesmo em baixas concentrações, pode inibir a expressão dos genes envolvidos na síntese da nitrogenase e reduzir sua atividade, suprimindo a fixação biológica de N_2 (Kumar; Mella-Herrera; Golden, 2010; Esteves-Ferreira et al., 2017).

Assim, os resultados indicam que as linhagens avaliadas apresentam potencial de fixação biológica de nitrogênio, característica relevante para sua aplicação como biofertilizantes em sistemas agrícolas.

Tabela 3 – Valores de nitrogênio fixado de cada linhagem observada através da análise de GC em nmol $N_2.g^{-1}$ ms.h^{-1}

(Continua)

Amostra	**Nitrogênio fixado (nmol $N_2.g^{-1}$ ms.h^{-1})**
UFLA 11	5,19 ± 8,99
UFLA 26	76,90 ± 69,10
UFLA 37	94,84 ± 76,16

Tabela 3 – Valores de nitrogênio fixado de cada linhagem observada através da análise de GC em nmol $N_2.g^{-1}$ ms.h^{-1}

(Conclusão)

Amostra	**Nitrogênio fixado (nmol $N_2.g^{-1}$ ms.h^{-1})**
UFLA 27	196,83 ± 341,00
UFLA 19	63,82 ± 110,50

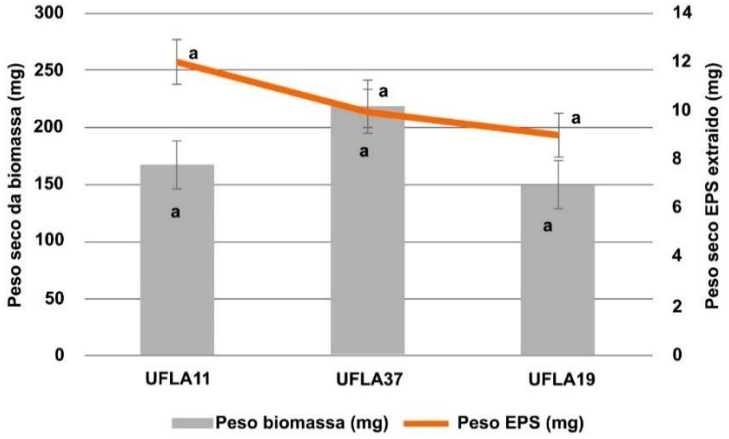
Fonte: Da autora (2026)

3.4.3 Extração de exopolissacarídeo (EPS)

Para a análise de extração de exopolissacarídeo (EPS), as cinco linhagens inicialmente cultivadas em tubo de ensaio foram transferidas para frascos Erlenmeyer contendo 100 mL de meio de cultura BG-11_0 com o objetivo de promover o crescimento escalonado da biomassa. No entanto, as linhagens UFLA 26 e UFLA 27 não conseguiram manter crescimento durante essa etapa, apresentando baixa adaptação às condições de cultivo em maior volume. O crescimento escalonado da biomassa constitui também um critério importante para pré-seleção de linhagens, uma vez que a capacidade de crescimento em maior volume está diretamente relacionada ao potencial de aplicação biotecnológica desses microrganismos. Considerando ainda que, nas análises anteriores de clorofila *a* e absorbância, essas linhagens apresentaram desempenho inferior ao esperado, optou-se por excluí-las da análise subsequente de produção de EPS.

Dessa forma, a Figura 7 apresenta os resultados da produção de EPS das linhagens UFLA 11, UFLA 37 e UFLA 19.

Figura 7– Peso seco de EPS (mg) extraído a partir do peso seco de biomassa (mg) das linhagens UFLA 11, UFLA 37 e UFLA 19



Legenda: colunas em cinza representam os pesos da biomassa (mg) obtida e a linha representa os pesos da EPS (mg) extraída. Letras iguais não apresentam diferença estatístico (*p=0,05*).

Fonte: Da autora (2026)

As linhagens UFLA 11, UFLA 37 e UFLA 19 produziram, respectivamente, 12 mg, 10 mg e 9 mg de EPS, a partir de 167 mg, 220 mg e 150 mg de biomassa seca. Considerando o volume de sobrenadante obtido, a produção correspondeu a 133,33 $mg \cdot L^{-1}$, 117,65 $mg \cdot L^{-1}$ e 109,76 $mg \cdot L^{-1}$, respectivamente. Esses valores são inferiores aos relatados na literatura para cianobactérias do gênero *Nostoc* nas quais a produção de EPS pode ultrapassar 1300 $mg.L^{-1}$, evidenciando variações expressivas no potencial produtivo entre diferentes linhagens (Alvarez et al., 2021).

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que as linhagens avaliadas apresentam diferentes capacidades de produção de exopolissacarídeos, indicando que a eficiência de produção de EPS não está necessariamente associada ao acúmulo total de biomassa. Observa-se por exemplo que, a UFLA 37 apresentou maior produção de biomassa, porém menor eficiência relativa de produção de EPS quando comparada às linhagens UFLA 11 e UFLA 19, sugerindo que a produção de exopolissacarídeos pode estar mais relacionada a características fisiológicas e metabólicas específicas de cada linhagem do que ao crescimento celular Esse comportamento também foi observado em estudos com diferentes espécies de cianobactérias, nos quais a produção de EPS variou significativamente entre linhagens mesmo sob condições de cultivo semelhantes, refletindo diferenças fisiológicas e metabólicas específicas (Pereira et al., 2009; Cruz et al., 2023).

A produção de exopolissacarídeos em cianobactérias constitui um processo metabólico complexo e altamente regulado, influenciado por fatores ambientais e nutricionais. Entre esses

fatores destacam-se a intensidade luminosa, disponibilidade de nutrientes, temperatura e salinidade, que podem estimular ou reduzir a síntese desses polímeros extracelulares (Wu et al., 2025; Laroche, 2022). Além disso, a produção de EPS pode ser estimulada em condições de limitação nutricional, principalmente quando ocorre desequilíbrio na relação carbono/nitrogênio do meio de cultivo. Nessas situações, parte do carbono assimilado pode ser direcionada para a síntese de polímeros extracelulares, funcionando como mecanismo de adaptação celular e proteção contra estresse ambiental. Esse fenômeno já foi descrito em diferentes espécies do gênero Nostoc, nas quais a produção de EPS aumenta em resposta a condições ambientais adversas ou a alterações no balanço nutricional das culturas (Tamaru et al., 2005; Alvarez et al., 2021).

3.4.4 Identificação das linhagens de cianobactérias

As análises das sequências obtidas revelaram que as linhagens UFLA 11, UFLA 26, UFLA 27 e UFLA 19 foram identificadas como *Nostoc ellipsosporum*, enquanto a linhagem UFLA 37 foi classificada como *Pseudoaliinostoc soli*, pertencente à ordem Nostocales. Esse resultado evidencia a presença de diversidade taxonômica entre linhagens previamente agrupadas com base em características morfológicas, reforçando a importância do uso de ferramentas moleculares para a correta identificação de cianobactérias (Komárek et al., 2014; Johansen; Casamatta, 2005).

Pseudoaliinostoc soli é um táxon recentemente descrito dentro das cianobactérias heterocitadas e apresenta características morfológicas e funcionais semelhantes às espécies de *Nostoc,* incluindo a presença de heterócitos, acinetos e formação de hormogônios, estruturas associadas à fixação biológica de nitrogênio, resistência a estresses ambientais e capacidade de colonização (Zhang et al., 2022). Além disso, essa espécie é tipicamente associada a ambientes terrestres, o que pode representar uma vantagem ecológica em relação à linhagem de origem aquática frequentemente utilizada em estudos com biofertilizantes.

Cianobactérias heterocitadas de ambiente edáfico são reconhecidas por sua elevada capacidade de fixação de nitrogênio e produção de compostos bioativos, como exopolissacarídeos e substâncias promotoras de crescimento vegetal, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo e para o desenvolvimento das plantas (Rossi; De Philippis, 2015; Nicoletti, 2022). Dessa forma, a utilização da UFLA 37 (*P. soli*) como biofertilizante mostra-se coerente do ponto de vista ecológico e funcional, uma vez que suas características fisiológicas e sua adaptação ao ambiente do solo podem favorecer sua sobrevivência,

estabelecimento na rizosfera e interação com as plantas. Esses aspectos podem estar relacionados às respostas observadas no desenvolvimento das plantas ao longo do experimento.

3.4.5 Seleção de uma linhagem para aplicação como biofertilizante

A partir das análises apresentadas anteriormente, a *Pseudoaliinostoc soli* (linhagem UFLA 37) foi selecionada para aplicação da biomassa como biofertilizante na cultura de feijão. Embora essa linhagem não tenha apresentado maior valor de peso seco da biomassa e não tenha apresentado resultado expressivo na análise de produção de EPS, os resultados obtidos nas análises de clorofila *a,* absorbância e atividade da nitrogenase foram determinantes para sua escolha.

A absorbância constitui uma medida amplamente utilizada para estimar o crescimento de culturas de cianobactérias, sendo diretamente relacionado à densidade celular e ao aumento da biomassa no cultivo (Diao; Yang, 2014). Da mesma forma, os teores de clorofila *a* estão associados à capacidade fotossintética das células, refletindo a eficiência de absorção de luz e a realização de fotossíntese (Fernandes et al., 2009), processos fundamentais para a produção de energia e crescimento celular.

Assim, os resultados dessas análises foram considerados relevantes no processo de seleção da linhagem, uma vez que o objetivo foi identificar cianobactéria capaz de apresentar maior crescimento de biomassa em menor tempo de cultivo, característica desejável para aplicações futuras como biofertilizante.

3.5 Solubilização de fosfato pela cianobactéria

A análise do Índice de Solubilização (IS) de fosfato foi realizada exclusivamente para a linhagem UFLA 37, com o objetivo de avaliar sua capacidade de solubilizar fosfato em meio sólido, considerando sua posterior aplicação no solo durante o experimento. Os valores de IS obtidos apresentaram baixa variação entre as repetições experimentais conforme apresentado na Tabela 4. Os valores médios foram de 129,67 ± 4,67, 138,23 ± 6,88 e 134,07 ± 10,97 para as amostras UFLA 37-1, UFLA 37-2 e UFLA 37-3, respectivamente, indicam comportamento relativamente consistente da linhagem quanto à capacidade de solubilização de fosfato em meio sólido.

A formação homogênea dos halos de solubilização sugere produção consistente de metabólitos envolvidos nesse processo, especialmente ácidos orgânicos de baixo peso

molecular, capazes de reduzir o pH do microambiente e promover a solubilização de fosfatos insolúveis presente no meio de cultivo (Rodríguez; Fraga, 1999; Sharma et al., 2013). A solubilização de fosfato por microrganismos é considerada um dos principais mecanismos de promoção do crescimento vegetal, uma vez que grande parte do fósforo presente no solo encontra-se em formas insolúveis ou pouco disponíveis para as plantas (Alori; Glick, 2017; Liu et al., 2023). Nesse contexto, microrganismos capazes de solubilizar compostos fosfatados podem contribuir significativamente para o aumento da disponibilidade de fósforo no solo e, consequentemente, para o crescimento vegetal.

Estudos recentes também demonstram que cianobactérias podem atuar como microrganismos promotores de crescimento vegetal, não apenas pela fixação biológica de nitrogênio, mas também pela capacidade de solubilizar fosfato e produzir metabólitos bioativos que favorecem o desenvolvimento das plantas (Singh et al., 2016; Nawaz et al., 2024; Farda et al., 2024).

Nesse contexto, os resultados obtidos indicam que a linhagem UFLA 37 apresenta capacidade de solubilização de fosfato, característica relevante para sua aplicação como biofertilizante em sistemas agrícolas.

Tabela 4 – Índice de Solubilização (IS) de fosfato da linhagem UFLA 37 em meio sólido

Amostra	**Índice de Solubilização (IS)**
UFLA 37 – 1	129,67 ± 4,67
UFLA 37 – 2	138,23 ± 6,88
UFLA 37 – 3	134,07 ± 10,97

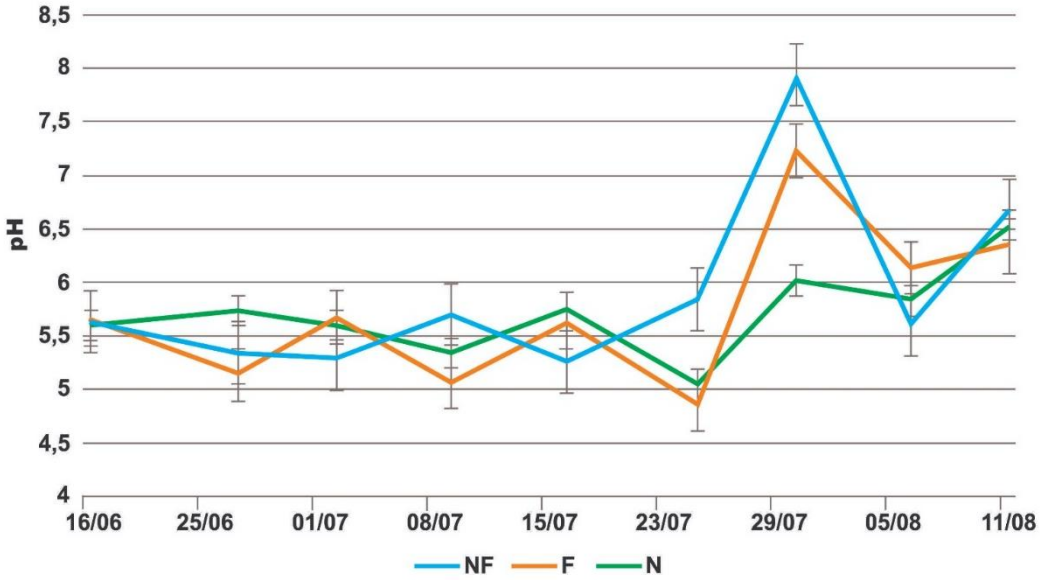
Fonte: Da autora (2026)

3.6 Crescimento e produtividade do feijoeiro Ouro negro

3.6.1 pH do solo

O pH do solo avaliado é apresentado na Figura 8 que segue abaixo. As medições foram realizadas antes da semeadura (16/06), e depois a cada sete dias, ao longo do experimento, no intuito de observar a variação do pH.

Figura 8 – Variação do pH do solo observado a cada sete dias ao longo do experimento



Legenda: biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura (NF), dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria (F) e somente aplicação de biomassa de cianobactéria (N).

Fonte: Da autora (2026)

O pH inicial do solo era de 6, e observa-se que o pH se manteve levemente ácido ao longo do experimento. Um pico acentuado observado na coleta de 64 DAS (29/07) pode estar associado a respostas momentâneas da dinâmica químico-biológica do solo em função da aplicação de fertilizante comercial e da presença de *Nostoc*. O fertilizante comercial pode alterar temporariamente o equilíbrio iônico e a atividade microbiana ao ser incorporado ao solo, afetando o pH local devido à sua composição e rápida solubilidade no solo (Machado, 2025). Adicionalmente, inoculações com cianobactérias fixadoras de nitrogênio, como as do gênero *Nostoc*, têm sido associadas à modificação de propriedades físico-químicas do solo, incluindo alterações na fertilidade e na atividade microbiana que podem, de forma transitória, influenciar o pH (Hakkoum et al., 2025). Tais organismos podem promover a liberação de compostos orgânicos, realizar a fixação de nitrogênio e estimular as comunidades microbianas, levando a pequenas variações no balanço ácido-base do solo em determinados períodos de alta atividade metabólica. De forma geral, o pH apresentou estável ao longo do cultivo, o que favorece a disponibilidade de nutrientes essenciais, especialmente em leguminosas como o feijão, contribuindo para condições adequadas ao desenvolvimento das plantas.

3.6.2 Análises biométricos do feijoeiro

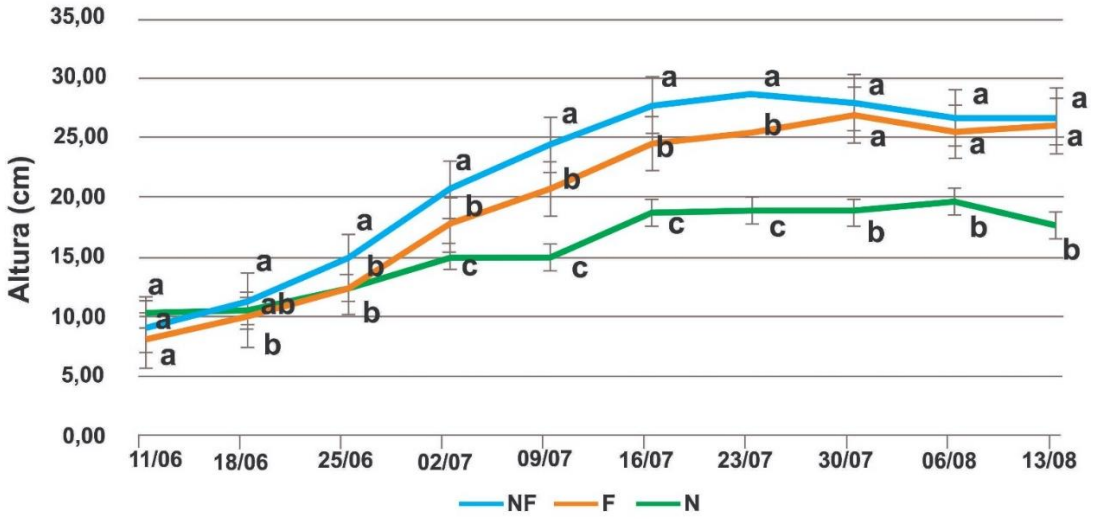
O desenvolvimento do feijoeiro foi monitorado a cada sete dias, até atingir a senescência, por meio da avaliação da altura, diâmetro do caule e número de folhas.

3.6.2.1 Altura das plantas

A Figura 9 apresenta alturas das plantas de feijoeiro medida ao longo do período experimental. Observa-se que a altura foi influenciada significativamente pelos tratamentos ao longo do ciclo de cultivo. Na avaliação inicial (16 DAS - 11/06), não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos, indicando crescimento inicial semelhante entre as plantas. Esse comportamento é esperado nas fases iniciais do desenvolvimento, pois o crescimento vegetal é predominantemente dependente das reservas da semente e das condições iniciais do substrato, sendo ainda limitada a influência de bioinsumos aplicados ao solo (Taiz et al., 2017; Rouphael; Colla, 2020).

A partir do 30 DAS (25/06), observa-se que o tratamento NF apresentou maior valor médio de altura das plantas (14,44±0,87) quando comparado ao tratamento F (12,44±1,16) e N (12,38±0,92), apresentando diferenças estatísticas entre os tratamentos ($p>0,05$). Este comportamento se manteve até o 58 DAS (23/07), período em que o tratamento NF permaneceu estatisticamente superior aos demais, apresentando maiores valores de altura, enquanto o tratamento N apresentou as menores médias, diferindo estatisticamente dos demais. Nas avaliações finais, 65 DAS (30/07) a 79 DAS (13/08), período correspondente a senescência da planta, observa-se que os tratamentos NF e F não apresentaram diferença significativa entre si ($p<0,05$), embora ambos tenham mantido valores de altura superiores ao tratamento N. Esse comportamento indica que, embora o fertilizante seja capaz de sustentar o crescimento vegetativo da cultura, a associação com biomassa de *Nostoc* pode favorecer o crescimento das plantas principalmente durante as fases intermediárias do desenvolvimento, período caracterizado por maior atividade metabólica e maior demanda por nutrientes.

Figura 9 – Altura (cm) das plantas submetidas aos tratamentos NF, F e N, medidas a cada sete dias ao longo do ciclo da cultura



Legenda: biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura (NF), dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria (F) e somente aplicação de biomassa de cianobactéria (N).
Letras iguais não apresentam diferença estatístico ($p=0,05$).

Fonte: Da autora (2026)

O maior crescimento em altura observado no tratamento NF ao longo do ciclo sugere um efeito combinado entre o fertilizante e a biomassa de *Nostoc*, possivelmente relacionado à produção de metabólitos bioativos, como fitormônios associados ao alongamento celular e ao crescimento da parte aérea (Ronga et al., 2019). Além disso, esses microrganismos podem atuar na melhoria da fertilidade do solo por meio da fixação biológica de nitrogênio, solubilização de nutrientes e estímulo à atividade microbiana da rizosfera (Chittora et al., 2020).

Outro mecanismo importante associado ao uso de cianobactérias em sistemas agrícolas está relacionado à produção de exopolissacarídeos (EPS), compostos que contribuem para a agregação do solo, aumento da retenção de água e maior disponibilidade de nutrientes na região rizosférica (Roncero-Ramos et al., 2019). Essas alterações no microambiente do solo podem favorecer o desenvolvimento radicular e, consequentemente, promover maior crescimento da parte aérea das plantas (Rossi; De Philippis, 2015). Dessa forma, a presença de *Nostoc* no tratamento NF pode ter contribuído para a criação de condições mais favoráveis ao desenvolvimento da cultura, refletindo nos maiores valores de altura observados.

O desempenho intermediário do tratamento F indica que, embora a aplicação de fertilizante seja eficiente para promover o crescimento, sua associação com microrganismos promotores de crescimento pode potencializar esse efeito. Segundo Rouphael e Colla (2020), a

combinação entre a fertilização mineral e biofertilizantes microbianos tende a aumentar a eficiência de utilização de nutrientes pelas plantas, promovendo maior crescimento vegetativo e melhor desenvolvimento das culturas. Por outro lado, os resultados do tratamento N sugerem que, embora a biomassa aplicada apresente potencial bioestimulante, sua aplicação isolada pode não ser suficiente para expressar plenamente seus efeitos sobre o crescimento vegetal, possivelmente em função dos desafios associados ao estabelecimento e à atuação do microrganismo no solo.

Resultados semelhantes têm sido relatados em estudos que avaliaram a aplicação de cianobactérias como biofertilizantes em diferentes culturas agrícolas, especialmente quando utilizadas em associação com outras fontes de nutrientes. Dobrojan, Dobrojan e Melnic (2025), ao avaliarem biofertilizantes derivados de *Nostoc* no cultivo de *Echinacea purpurea*, observaram aumento significativo em parâmetros de crescimento vegetal, incluindo comprimento das plantas, área foliar e produção de biomassa. Estudos conduzidos por Al-Sherif et al. (2015) com feijão-fava demonstraram que a aplicação conjunta de cianobactérias e fertilizante orgânico resultou em maior peso seco das plantas em comparação ao uso isolado de fertilizantes, indicando efeito sinérgico entre os microrganismos e as fontes de nutrientes no solo.

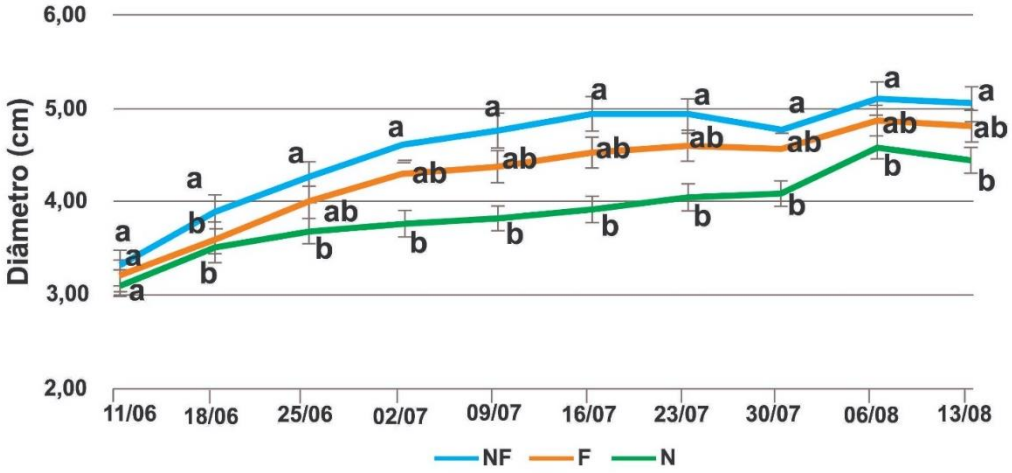
Esses resultados corroboram os dados observados no presente estudo, nos quais o tratamento combinado com biomassa de *Nostoc* e fertilizante apresentou maiores valores de altura das plantas ao longo do ciclo da cultura, sugerindo que a associação entre biofertilizantes microbianos e fertilização mineral pode favorecer o crescimento vegetal e melhorar a eficiência nutricional das plantas.

Por fim, a ausência de diferença estatística entre NF e F nas fases finais pode sugerir que os efeitos promotores de crescimento associado à biomassa de *Nostoc* são mais evidentes durante as fases intermediárias do desenvolvimento da planta.

3.6.2.2 Diâmetro dos caules das plantas

A Figura 10 apresenta os valores de diâmetro do caule das plantas medidos ao longo do experimento. O aumento progressivo do diâmetro do caule observado em todos os tratamentos está diretamente relacionado ao avanço do desenvolvimento vegetativo da cultura, refletindo maior acúmulo de biomassa estrutural e maior capacidade de sustentação da parte aérea (Taiz et al., 2017).

Figura 10 – Diâmetro médio do caule (cm) das plantas submetidas aos tratamentos NF, F e N, medidas a cada sete dias ao longo do ciclo da cultura



Legenda: biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura (NF), dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria (F) e somente aplicação de biomassa de cianobactéria (N).
Letras iguais não apresentam diferença estatístico (*p=0,05*).

Fonte: Da autora (2026)

Conforme observado na Figura 10, nas primeiras avaliações, 16 DAS (11/06) e 23 DAS (18/06) não foram verificadas diferenças estatísticas entre os tratamentos (p>0,05), sugerindo que, nos estádios iniciais de desenvolvimento, o fertilizante aplicado de forma isolado ou associado à biomassa de *Nostoc* ainda não havia promovido efeito diferencial expressivo sobre o espessamento do caule. Nesse período, o crescimento caulinar tende a ser fortemente influenciado pelas reservas contidas na semente e pela disponibilidade imediata de nutrientes no solo (Marschner, 2012).

A partir do 30 DAS (25/06), observa-se tendência de maior diâmetro do caule no tratamento NF (4,25±0,27), seguido pelo tratamento F (4,00±0,30), enquanto o tratamento N apresentou os menores valores médios (3,69±0,21). Essa tendência se manteve até o final do período experimental avaliado, onde o tratamento NF apresentou os maiores valores médios de diâmetro do caule, apresentando diferença significativa do tratamento N, enquanto o tratamento F apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente de NF nem de N.

Esses resultados indicam que, a partir do período de crescimento mais intenso da parte aérea, o tratamento NF apresentou desempenho superior, sugerindo efeito sinérgico entre o fertilizante e a biomassa de *Nostoc*. Esse efeito pode estar associado à maior disponibilidade de nutrientes no solo aliada à ação das cianobactérias na produção de exopolissacarídeos, os quais contribuem para a melhoria da estrutura do solo, maior retenção de água e estímulo à atividade

microbiana (Ramakrishnan et al., 2023). Além disso, os EPS produzidos por cianobactérias podem formar uma matriz polissacarídica capaz de estabilizar agregados do solo e favorecer a retenção de carbono e nutrientes, além de estimular a atividade microbiana na rizosfera (Mager; Thomas, 2010; Parwani; Bhatt; Singh, 2021; Kumar; Kastanek; Adhikary, 2018).

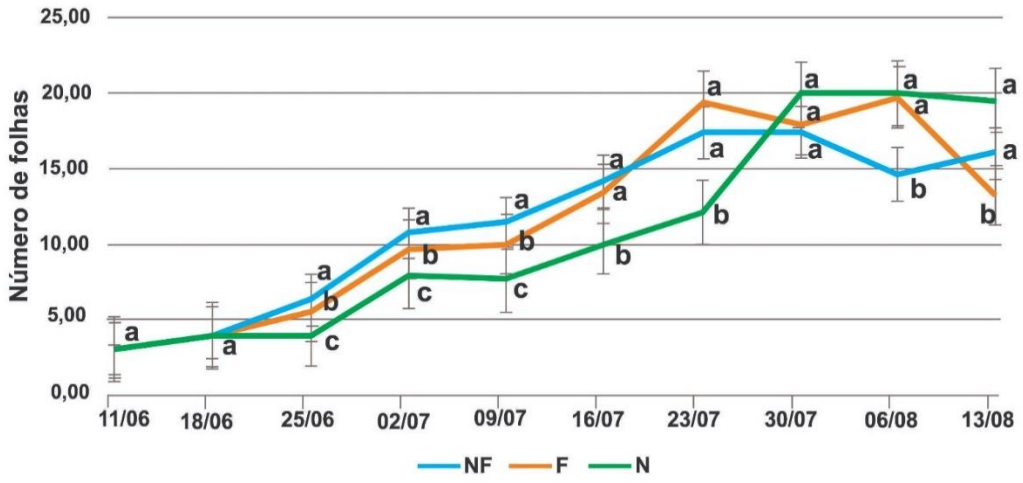
Além disso, o gênero *Nostoc* é reconhecido pela produção de substâncias com potencial bioestimulante, incluindo fitohormônios capazes de estimular a divisão e expansão celular, processos diretamente relacionados ao crescimento vegetal e ao espessamento do caule (Paiva et al., 2023). Esse mecanismo pode explicar o melhor desempenho observado no tratamento NF em comparação ao uso isolado da biomassa de *Nostoc*.

De forma geral, a aplicação da biomassa isoladamente não promoveu efeito significativo sobre o diâmetro do caule, indicando que, embora apresente potencial bioestimulante, a biomassa de *Nostoc* pode não ser suficiente para suprir completamente a demanda nutricional da cultura, atuando principalmente como insumo complementar que potencializa os efeitos da fertilização química quando aplicada de forma associada.

3.6.2.3 Número de folhas das plantas

Os números de folhas contabilizados ao longo do experimento são apresentados na Figura 11 que segue abaixo.

Figura 11 - Número de folhas das plantas submetidas aos tratamentos NF, F e N, contabilizadas a cada sete dias ao longo do ciclo da cultura



Legenda: biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura (NF), dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria (F) e somente aplicação de biomassa de cianobactéria (N).
Letras iguais não apresentam diferença estatístico ($p=0,05$).

Fonte: Da autora (2026)

O número de folhas por planta variou ao longo do ciclo do feijoeiro em função dos tratamentos avaliados, com efeito dependente do tempo de avaliação. Nas avaliações iniciais realizadas em 16 DAS (11/06) e 23 DAS (18/06), não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p>0,05$), indicando desenvolvimento foliar inicialmente semelhante entre as plantas, independentemente do manejo nutricional adotado.

A partir do 30 DAS (25/06), pode ser observado diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p\leq0,05$). Nessa mesma data, o tratamento NF apresentou maior número de folhas (6,25±0,29), diferindo significativamente de F (5,50±0,41) e N (4,00±0,00), sendo o tratamento N com menor quantidade de folhas. Esse comportamento pode indicar mais uma vez o efeito sinérgico entre o fertilizante e a atividade biológica da biomassa de *Nostoc* aplicada. A presença da cianobactéria no solo pode contribuir para a melhoria da rizosfera por meio da liberação de exopolissacarídeos, ácidos orgânicos e substâncias bioativas, as quais aumentam a absorção de nutrientes e estimulam o crescimento vegetativo, podendo refletir diretamentente no número de folhas (Yadav et al., 2023).

Esse padrão se manteve nas avaliações do 37 DAS (02/07) e 44 DAS (09/07), onde o tratamento NF permaneceu estatisticamente superior (10,75±0,65 e 11,38±1,11 respectivamente), seguido por F (9,63±0,85 e 10,00±1,73) respectivamente, e por N (7,88±0,48 e 7,63±0,75 respectivamente), evidenciando o efeito positivo da combinação entre biomassa de *Nostoc* e fertilizante mineral sobre a emissão foliar.

Na avaliação de 51 DAS (16/07), o tratamento NF ainda continuou apresentando os maiores valores médios de número de folhas (14,13±0,25), diferindo significativamente do tratamento N (10,13±0,85), porém não diferindo estatisticamente do tratamento F (13,38±1,11). Resultado semelhante foi observado em 58 DAS (23/07), quando NF e F não diferiram entre si (17,38±0,25 e 19,50±0,71 respectivamente), mas ambos apresentaram número de folhas significativamente superior ao tratamento N. O menor desempenho do tratamento N pode estar associado à liberação gradual de nutrientes pela biomassa, o qual depende do processos de mineralização e adaptação ao solo, resultando em resposta mais lenta quando comparado ao fertilizante químico de pronta disponibilidade (Marín-Marín et al., 2024). Por outro lado, o tratamento F, apesar de fornecer minerais prontamente disponível para as plantas, não apresenta os efeitos adicionais relacionados à atividade microbiana e aos processos biológicos promovidos pela biomassa de *Nostoc*, o que pode explicar o desempenho intermediário observado quando comparado ao tratamento NF.

Na avaliação do 65 DAS (30/07), não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p>0,05$), indicando uma fase de estabilização do número de

folhas. Esse período pode ser um período de transição fisiológica da cultura, no qual ocorre redistribuição de assimilados e possível equilíbrio temporário entre crescimento vegetativo e início de processos reprodutivos, reduzindo a sensibilidade do número de folhas às diferenças de manejo nutricional (Fageria, 2014).

Nas avaliações finais, diferenças estatísticas voltaram a ser evidenciadas ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos. O maior número de folhas são observados nos tratamentos N (19,50±1,80) e NF (16,00±1,22), em comparação ao F (13,25±1,85), o que pode indicar diferenças no padrão de senescência foliar devido a presença da biomassa. A redução do número de folhas no tratamento F pode estar relacionada a uma antecipação do ciclo vegetativo, favorecida pelo melhor suprimento nutricional nas fases anteriores, resultando em maior remobilização de nutrientes para órgãos reprodutivos (Taiz et al., 2017). Por outro lado, a manutenção de folhas nos tratamentos com aplicação de biomassa sugere um efeito prolongado da atividade biológica da cianobactéria, possivelmente associado à liberação contínua de compostos bioestimulantes ao longo do ciclo (Chittora et al, 2020).

3.6.2.4 Caracterização visual do desenvolvimento das plantas

Com o objetivo de ilustrar visualmente as diferenças no desenvolvimento das plantas entre os tratamentos avaliados, a Figura 12 apresenta o aspecto geral das plantas aos 46 DAS, evidenciando variações no porte e no desenvolvimento da parte aérea. Visualmente, observa-se que plantas submetidas ao tratamento NF apresentam maior desenvolvimento da parte aérea e maior vigor vegetativo quando comparadas aos demais tratamentos, corroborando os resultados obtidos para altura de plantas e diâmetro do caule discutidos nas seções anteriores.

Figura 12 – Comparação visual do porte e do desenvolvimento da parte aérea de plantas de feijão cultivadas sob diferentes tratamentos

Legenda: Da esquerda para a direita: NF (Biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura), F (dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria) e N (somente aplicação de biomassa de cianobactéria).

Fonte: Da autora (2026)

3.6.2.5 Aspectos morfológicos do sistema radicular

Ao realizar a coleta das plantas no estádio R6 (59 DAS), foi conduzida uma avaliação visual do sistema radicular, com o objetivo de verificar possíveis diferenças morfológicas associadas aos tratamentos. O sistema radicular das plantas pode ser visualizado na Figura 13.

A avaliação qualitativa do sistema radicular evidenciou diferenças morfológicas entre os tratamentos, corroborando os resultados observados para o crescimento da parte aérea. Plantas submetidas ao tratamento NF apresentaram sistema radicular visualmente mais desenvolvido, com maior volume, maior densidade de raízes laterais e maior comprimento total, quando comparadas aos tratamentos F e N.

O maior desenvolvimento radicular em plantas tratadas com cianobactérias é frequentemente associado à produção de substâncias promotoras de crescimento, incluindo fitohormônios como auxinas e citocininas, que estimulam a formação de raízes laterais e o alongamento radicular, favorecendo a exploração do solo pelas plantas (Singh et al., 2016; Rossi; De Philippis, 2015).

Embora o tratamento F tenha apresentado crescimento satisfatório do sistema radicular, o padrão visual observado sugere que a associação entre o fertilizante e a biomassa de *Nostoc*

potencializa o desenvolvimento das raízes, refletindo-se em maior eficiência na absorção de água e nutrientes. Por outro lado, o tratamento com aplicação isolada de biomassa de *Nostoc* apresentou sistema radicular menos robusto, indicando que, apesar do potencial bioestimulante da cianobactéria, a presença de uma fonte mineral de fósforo pode ser determinante para maximizar o desenvolvimento radicular.

Este resultado reforça a importância do sistema radicular como base para o crescimento da parte aérea, uma vez que raízes mais desenvolvidas proporcionam maior sustentação da planta e maior capacidade de absorção de água e nutrientes, influenciando diretamente parâmetros como crescimento em altura, espessamento do caule e emissão foliar, conforme observado nas análises anteriores. Dessa forma, a avaliação visual do sistema radicular corrobora com a interpretação dos dados quantitativos obtidos para os parâmetros morfológicos da parte aérea.

Figura 13 – Sistema radicular das plantas de feijão coletadas ao 59 DAS, submetidas aos tratamentos NF, F e N

Legenda: A = NF NF (Biomassa de cianobactéria associada à dose integral (100%) do fertilizante comercial recomendada para a cultura), B = F (dose integral do fertilizante comercial sem aplicação de biomassa de cianobactéria) e C = N (somente aplicação de biomassa de cianobactéria).

Fonte: Da autora (2026)

3.6.2.6 Massa fresca e seca de folhas, caule e raízes e umidade das folhas e caules

A massa total das plantas foi obtida pela soma das massas de raiz, caule e folhas. O

maior acúmulo de biomassa foi observado no tratamento NF, com massa fresca total de 49,97 g e massa seca total de 7,17 g, indicando maior desenvolvimento vegetativo em comparação aos demais tratamentos. O tratamento F apresentou massa fresca total de 22,21 g e massa seca total de 4,88 g, enquanto o tratamento N apresentou os menores valores, com massa fresca total de 13,12 g e massa seca total de 2,36 g.

O maior acúmulo de biomassa observado no tratamento NF pode estar relacionado ao efeito combinado da aplicação do fertilizante e da biomassa de *Nostoc*, que pode favorecer tanto a maior disponibilidade de nutrientes no solo quanto processos fisiológicos associados ao crescimento vegetal. Microrganismos com potencial biofertilizante, incluindo cianobactérias, podem atuar como promotores de crescimento vegetal por meio da produção de metabólitos bioativos, estímulo à atividade microbiana do solo e melhoria da eficiência de absorção de nutrientes pelas plantas (Backer et al., 2018; Rouphael; Colla, 2020).

A Tabela 5 que segue abaixo apresenta os pesos frescos e secos médio (g) das folhas, raiz e caule coletados no estádio R6, 60 dias após semeadura.

Tabela 5 – Peso fresco médio (g) das folhas, raiz e caule e comprimento da maior raiz (cm) das plantas coletadas com DAS 60

Tratamento	**Raiz (g)**		**Caule (g)**		**Folhas (g)**		**Comprimento da maior raiz (cm)**
	Fresca	**Seca**	**Fresca**	**Seca**	**Fresca**	**Seca**	**Fresca**
NF	20,92±21,30[a]	1,93±2,38[b]	8,76±2,38[a]	2,02±0,58[a]	20,29±11,13[a]	3,22±1,89[a]	38,33±19,14[a]
F	8,82±6,33[b]	2,23±1,67[a]	4,96±1,26[b]	1,22±0,37[b]	8,43±2,65[b]	1,43±0,53[b]	28,33±14,15[b]
N	3,31±1,96[c]	0,56±0,31[c]	3,54±1,30[c]	0,77±0,31[c]	6,27±2,04[c]	1,03±0,39[c]	28,50±10,04[c]

Letras iguais não apresentam diferença estatístico (*p=0,05*).

Fonte: Da autora (2026)

O tratamento NF apresentou os maiores valores de massa fresca de raiz e comprimento da maior raiz, apresentando diferença estatística dos demais tratamentos ($p<0,05$). Maior

desenvolvimento radicular favorece a exploração do solo, ampliando a capacidade de absorção de água e nutrientes e reflete diretamente no crescimento da parte aérea (Holz et al., 2024; Camilo et al., 2021).

O tratamento NF também apresentou maior valor de biomassa fresca e seca de folhas e caule, refletindo maior eficiência no crescimento vegetativo e maior potencial fotossintético, uma vez que a massa foliar está diretamente relacionado à ampliação da área fotossinteticamente e à maior produção de fotoassimilados (Lambers et al., 2008). Esses resultados sugerem efeito sinérgico entre a fertilização mineral e a aplicação da biomassa de *Nostoc*, potencializando o crescimento das plantas quando comparado aos tratamentos aplicados de forma isolados. O tratamento F apresentou valores intermediários para a maioria das variáveis analisadas, enquanto o tratamento N, embora tenha promovido crescimento inferior, ainda contribuiu para o desenvolvimento das plantas.

Esse comportamento reforça o potencial das cianobactérias como agentes biofertilizantes, capazes de contribuir para a nutrição vegetal por meio da fixação biológica de nitrogênio, solubilização de nutrientes e produção de substâncias bioativas. Entretanto, quando aplicadas de forma isolada, podem não ser suficiente para maximizar o crescimento vegetal em curto prazo (Rossi; De Philippis, 2015; Chamizo et al., 2018).

Além disso, o maior acúmulo de biomassa seca observado no tratamento NF indica maior eficiência na conversão de fotoassimilados em estruturas vegetais, refletindo melhor desempenho fisiológico e nutricional das plantas. Esses resultados corroboram com estudos que demonstram que a associação entre insumos biológicos e fertilização mineral pode promover ganhos significativos no crescimento vegetal, conciliando produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Adesemoye; Kloepper, 2009; Chaudhary et al., 2022; Shahzad et al., 2025).

3.6.2.7 Teor de umidade de folhas e caules

A Tabela 6 apresenta os valores de porcentagem de umidade das folhas e dos caules coletados no estágio R6 (60 DAS). A análise de variância não indicou diferenças estatisticamente significativas ($p>0,05$) entre os tratamentos NF, F e N para a umidade das folhas e dos caules. Os valores de umidade foliar permaneceram elevados e semelhantes entre os tratamentos, variando aproximadamente entre 80% e 85%. Já a umidade do caule apresentou maior variabilidade entre os tratamentos, embora também não tenha sido observada diferença estatística significativa ($p>0,05$).

Tabela 6 – Umidade (%) das folhas e dos caules no DAS 60

Tratamento	Folha (%)	Caule (%)
NF	82,86±2,66[a]	85,40±3,77[a]
F	81,31±1,60[a]	78,36±7,06[a]
N	82,64±1,15[a]	76,82±4,31[a]

Médias seguidas pela mesma letra na coluna apresentam diferença estatístico pelo teste Tukey (p=0,05).

Fonte: Da autora (2026)

Ainda que sem diferença estatística, observa-se tendência de maiores valores médios de umidade foliar nos tratamentos NF e N. Esse comportamento pode estar associado à a aplicação de biomassa de *Nostoc*, que pode contribuir indiretamente para a manutenção da umidade no sistema solo-planta por meio da melhoria das propriedades físicas do solo, especialmente em função da produção de exopolissacarídeos, que favorecem a agregação do solo e a retenção hídrica (Rossi; De Philippis, 2015).

De modo geral, os resultados indicam que os tratamentos avaliados não promoveram alterações significativas no teor de umidade dos tecidos vegetais aos 60 DAS, sugerindo que, nas condições experimentais estudadas, a aplicação da biomassa de *Nostoc* isoladamente ou associada ao fertilizante mineral não influenciou de forma expressiva o estado hídrico das plantas.

3.6.2.8 Produtividade

Além dos parâmetros biométricos, foi avaliada a produtividade das plantas, incluindo número médio de vagens, comprimento médio de vagens, número médio de grãos e peso médio de grãos, cujos valores são apresentados na Tabela 7.

O maior número médio de vagens foi observado no tratamento NF, diferindo estatisticamente do tratamento F, enquanto o tratamento N apresentou valores intermediários. Esse resultado sugere que a associação entre a biomassa de *Nostoc* e fertilizante pode favorecer a formação de reprodutivas, possivelmente em função da melhoria da nutrição das plantas e do estímulo ao crescimento vegetativo observado nos estágios anteriores do desenvolvimento. Cianobactérias podem melhorar a fertilidade do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e estimular o crescimento das plantas, o que pode resultar em maior desenvolvimento vegetativo e incremento na produtividade das culturas (Ammar et al., 2023; Pagli et al., 2025).

O número de vagens é um dos principais componentes da produtividade em leguminosas,

sendo fortemente influenciado pelas condições nutricionais e pelo vigor vegetativo das plantas durante os estágios iniciais de crescimento (Taiz et al., 2017). Dessa forma, o maior número de vagens observado no tratamento NF pode estar associado ao maior desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular observado nesse tratamento, o que pode ter favorecido a formação e a sustentação das estruturas reprodutivas.

Por outro lado, o peso médio de grãos foi significativamente maior no tratamento F, indicando que a aplicação isolada do fertilizante contribuiu de forma mais eficiente para o enchimento dos grãos. O processo de enchimento de grãos está diretamente relacionado à disponibilidade de nutrientes e à eficiência na translocação de compostos fotossintéticos das folhas para os grãos durante a fase reprodutiva. Maior disponibilidade de nutrientes no solo pode favorecer o acúmulo de reservas nos grãos, resultando em aumento do peso final dos grãos (Smith; Rao; Merchant, 2018).

O comprimento médio de vagens e o número médio de grãos não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, sugerindo menor sensibilidade desses parâmetros às estratégias de manejo nutricional avaliadas neste estudo.

De forma geral, os resultados indicam um efeito complementar entre os tratamentos. Enquanto a aplicação de biomassa de *Nostoc* associada ao fertilizante favoreceu a formação de vagens, a aplicação isolada do fertilizante contribui para o aumento do peso médio dos grãos. Esses resultados sugerem que a combinação entre fertilização mineral e biomassa de *Nostoc* pode influenciar diferentes componentes de produtividade das plantas, atuando em etapas distintas do desenvolvimento reprodutivo.

Tabela 7 – Produtividade das plantas ao final do experimento

Tratamento	**Vagens**		**Grãos**	
	Número médio	**Comprimento médio (cm)**	**Número médio**	**Peso médio (g)**
NF	11,80 ±1,30[a]	8,48 ±0,31[a]	43,25 ±2,75[a]	12,95±0,56[b]
F	6,75±3,20[b]	8,44±0,10[a]	55±4,08[a]	15,31±1,99[a]
N	8,50±0,57[ab]	8,65±0,31[a]	43±5,03[a]	12,19±1,11[b]

Médias seguidas por letras iguais, na mesma coluna, não diferem entre si (*p=0,05*).

Fonte: Da autora (2026)

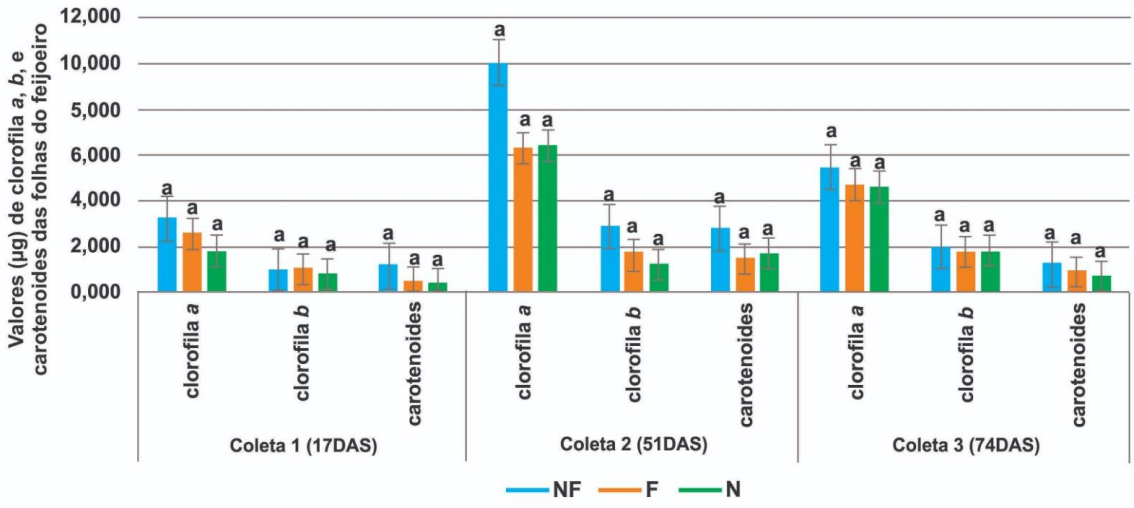
3.6.2.9 Avaliação dos pigmentos foliares

Os resultados da análise de pigmentos foliares são apresentados na Figura 14. Em relação a clorofila *a,* apesar das diferenças numéricas observadas entre os tratamentos, especialmente com valores mais elevados no tratamento NF na coleta 2, não foram verificados diferenças significativas entre os tratamentos dentro de cada tempo de coleta ($p>0.05$).

Para clorofila *b,* observa-se comportamento semelhante entre os tratamentos em todos os tempos avaliados, também sem diferenças estatísticas ($p>0.05$), sugerindo que as diferentes estratégias de fertilização não promoveram alterações nos teores desse pigmento.

Da mesma forma, os teores de carotenoides também não apresentaram diferenças significativas ($p>0.05$) entre os tratamentos. Entretanto, observa-se tendência de maiores valores médios no tratamento NF em alguns períodos, especialmente na coleta 2.

Figura 14 – Valores de clorofila *a, b* e carotenoides das folhas do feijoeiro coletados no 17, 51 e 74 DAS



Letras iguais não apresentam diferença estatístico ($p=0,05$)

Fonte: Da autora (2026)

Independentemente da ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos, observou-se um aumento nos teores de clorofila *a* da coleta 1 para a coleta 2, seguido de estabilização ou leve redução na coleta 3. Esse comportamento pode ser explicado pelo desenvolvimento do aparato fotossintético ao longo do ciclo da cultura, uma vez que a clorofila *a* está diretamente associada à capacidade fotossintética e tende a aumentar durante a fase de crescimento vegetativo, período em que ocorre maior expansão foliar e maior demanda energética para assimilação de carbono (Croce; van Amerongen, 2020).

Resultados semelhantes foram observados por Hosman, Abo-Shady e El-nagar (2020), que relataram aumento nos teores de pigmentos fotossintéticos em plantas tratadas com biomassa de *Nostoc muscorum,* indicando que cianobactérias podem atuar como bioestimulantes capazes de favorecer a atividade fotossintética das plantas.

A estabilização ou leve redução dos pigmentos nos estádios finais do ciclo pode estar relacionada ao redirecionamento de fotoassimilados para estruturas reprodutivas, bem como ao início de processos de senescência foliar, caracterizados pela degradação gradual dos pigmentos fotossintéticos e pela remobilização de nutrientes para órgãos em desenvolvimento (Woo et al., 2019).

De forma semelhante, os teores de clorofila *b* acompanharam o padrão geral de desenvolvimento das plantas, mantendo-se relativamente estáveis entre os tratamentos e ao longo do tempo, o que sugere manutenção da proporção entre os pigmentos fotossintéticos durante o ciclo avaliado. Já os carotenoides apresentaram aumento mais pronunciado na coleta 2, especialmente no tratamento NF. Esse comportamento pode estar associado ao papel desses pigmentos na fotoproteção e na controle do estresse oxidativo em períodos de maior atividade fotossintética (Thomas, 2013).

3.6.2.10 Análises microbiológicos do substrato

Os plaqueamentos dos substratos foram realizados com o objetivo verificar possíveis mudanças na comunidade microbiana do solo ao longo do desenvolvimento do feijoeiro, bem como avaliar a sobrevivência da biomassa de cianobactéria aplicada nos tratamentos. O plaqueamento das amostras de solo em meio BG-11_0 teve como objetivo confirmar a sobrevivência da biomassa de cianobactéria aplicada nos tratamentos NF e N. No entanto, não foi observado crescimento de colônias de *Nostoc* nas placas provenientes dessas amostras de solo.

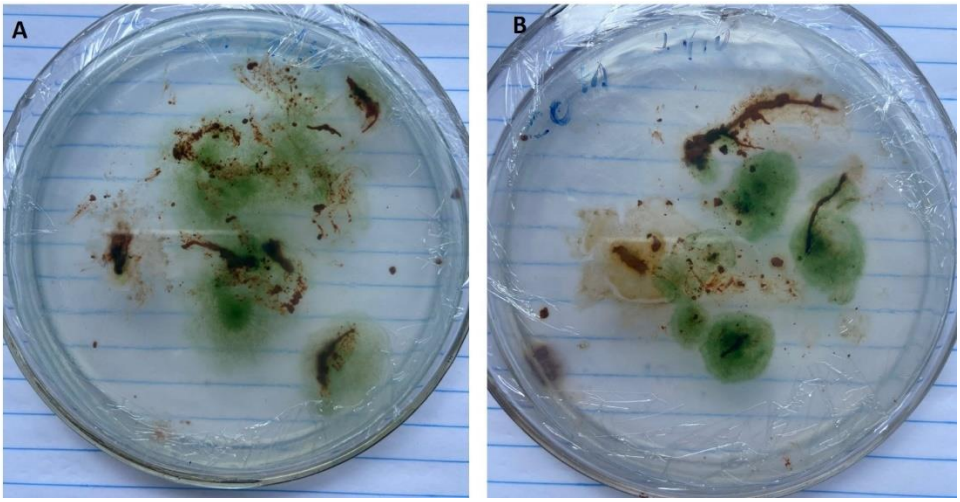
Entretanto, ao realizar a coleta das raízes das plantas dos tratamentos NF e N ao final do ciclo de cultivo e proceder ao plaqueamento dessas amostras em meio BG-11_0, foi observado crescimento de biomassa de cianobactéria em placas de Petri. Espécies do gênero *Nostoc* apresentam capacidade de colonizar a rizosfera e a superfície das raízes das plantas, onde encontram condições mais favoráveis para seu desenvolvimento devido à presença de exsudatos radiculares e maior disponibilidade de nutrientes, fatores que estimulam o estabelecimento de microrganismos benéficos na região radicular (Prasanna et al., 2013).

Dessa forma, a ausência de crescimento nas placas provenientes apenas das amostras de

solo pode estar relacionada à maior concentração dessas cianobactérias na região da rizosfera, o que explicaria o crescimento observado nas amostras obtidas diretamente das raízes.

A Figura 15 apresenta o crescimento da biomassa observado no plaqueamento realizado com amostras das raízes das plantas dos tratamentos NF e N ao final do experimento.

Figura 15 – Crescimento de cianobactérias em meio BG-11_0 obtido a partir do plaqueamento de amostras de raízes de plantas dos tratamentos NF (A) e N (B) ao final do experimento



Legenda: A = NF, B = N.

Fonte: Da autora (2026)

A Tabela 8 apresenta os valores dos UFC (unidade formadoras de colônias) dos solos calculadas. No solo inicial, antes da semeadura, foi observada elevada densidade microbiana ($2{,}57\times10^6$ UFC), refletindo a microbiota nativa previamente estabelecida. No entanto no 21 DAS, verificou-se redução expressiva no número de UFC em todos os tratamentos, independentemente da aplicação de N, F ou da combinação NF. Essa redução inicial pode estar associada ao distúrbio físico do solo, à reorganização da microbiota após a semeadura e à adaptação microbiana às novas condições da rizosfera. Esse comportamento é comum em sistemas agrícolas recém-implantados, nos quais ocorre um período de ajuste da comunidade microbiana (Seitz; Schutte; Drown, 2021).

Já aos 43 dias após a semeadura, observou-se recuperação da população microbiana. O tratamento que apresentou maior aumento foi o NF ($9{,}80 \times 10^5$ UFC), seguido do tratamento N ($9{,}30 \times 10^5$ UFC), enquanto o tratamento F manteve valores inferiores ($3{,}80 \times 10^5$ UFC). O aumento progressivo das UFC a partir dos 43 DAS indica estímulo da microbiota rizosférica, o qual pode estar relacionado com à maior liberação de exsudatos radiculares ao longo do desenvolvimento do feijoeiro. Esses compostos orgânicos atuam como fonte de carbono e

energia, favorecendo o crescimento microbiano (Marschner; Crowley; Rengel, 2011). Além disso, os tratamentos com a biomassa de *Nostoc* apresentaram recuperação microbiana mais rápida, podendo sugerir que a cianobactéria pode atuar como um bioestimulante da microbiota do solo. Este comportamento pode ocorrer devido a liberação de exopolissacarídeos e liberação gradual de nutrientes como nitrogênio orgânico e fontes orgânicas de carbono (Chittora et al, 2020; Paiva et al., 2023).

Aos 78 DAS, todos os tratamentos apresentaram incremento acentuado das UFC, destacando-se F com $2{,}26 \times 10^6$ UFC e N com $2{,}00 \times 10^6$ UFC. Maiores valores de UFC nos tratamentos F pode estar relacionado com a maior disponibilidade de fósforo, o qual estimula o metabolismo microbiano (Richardson et al., 2009). Já no tratamento N, a persistência da biomassa cianobacteriana no solo pode ter contribuído para a manutenção de um ambiente favorável à colonização microbiana.

O menor valor de UFC no tratamento NF comparado aos demais tratamentos neste estádio podem ser explicado pela estabilização da comunidade microbiana ao longo do cultivo. Além disso, a associação entre *Nostoc* e fertilizante pode ter promovido uma seleção de microrganismos mais eficientes metabolicamente, o que pode resultar em atividades biológicas com menor abundância de colônias no solo (Nannipieri et al., 2017).

Assim, os resultados indicam que, a aplicação de *Nostoc* de forma isolada ou em associação ao fertilizante pode influenciar positivamente no desenvolvimento da cultura do feijoeiro, além de contribuir para a dinâmica da microbiota do solo so longo do ciclo, o que reforça o seu potencial como biofertilizante e promotor de qualidade biológica do solo.

Tabela 8 – Unidades Formadoras de Colônias (UFC) do solo

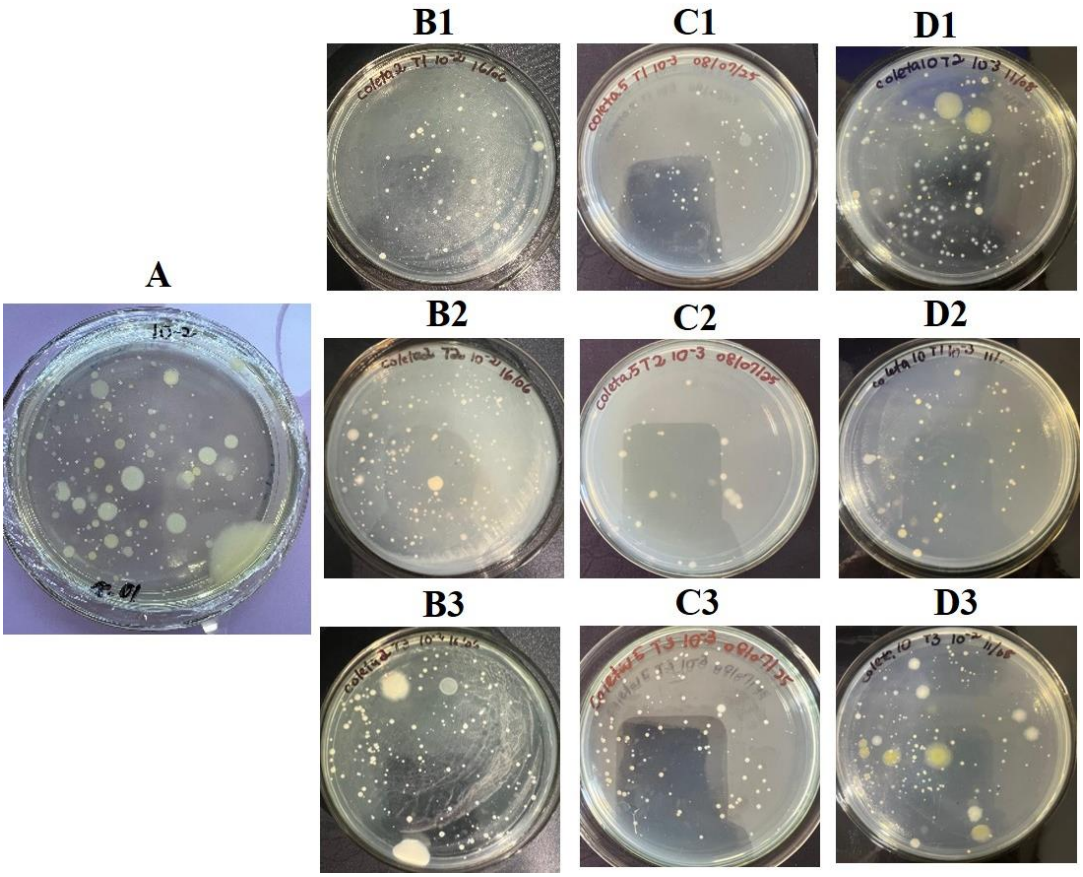
Data	**NF**	**F**	**N**
21 DAS (16/06/2025)	$2{,}30 \times 10^5$	$3{,}08 \times 10^5$	$2{,}80 \times 10^5$
43 DAS (08/07/2025)	$9{,}80 \times 10^5$	$3{,}80 \times 10^5$	$9{,}30 \times 10^5$
78 DAS (12/08/2025)	$1{,}33 \times 10^6$	$2{,}26 \times 10^6$	$2{,}00 \times 10^6$

Fonte: Da autora (2026)

A Figura 16 apresenta o crescimento microbiano observado nas placas provenientes das amostras de solo coletadas em três tempos após a semeadura (21, 43 e 78 DAS). Foram observadas diferenças visuais na formação das colônias entre os tratamentos e períodos de coleta, sugerindo alterações no crescimento microbiano ao longo do ciclo da cultura. Contudo, considerando que não foram realizadas análises de caracterização morfológica ou identificação

dos microrganismos presentes, os resultados não permitem conclusões sobre a diversidade ou estrutura da comunidade microbiana do solo.

Figura 16 – Imagens dos plaqueamentos dos solos dos tratamentos NF, F e N realizados antes da semeadura, no 21 DAS, 43 DAS e 78 DAS em meio ágar nutriente



Legenda: A = solo inicial (antes da semeadura); B1 = coleta 21 DAS – tratamento NF, B2 = coleta 21 DAS – tratamento F, B3 = coleta 21 DAS – tratamento N; C1 = coleta 43 DAS – tratamento NF, C2 = coleta 43 DAS – tratamento F, C3 = coleta 43 DAS – tratamento N; D1 = coleta 78 DAS – tratamento NF, D2 = coleta 78 DAS – tratamento F, D3 = coleta 78 DAS – tratamento N.

Fonte: Da autora (2026)

No solo inicial (A), antes da semeadura, verificou-se elevada quantidade de colônias nas placas, em concordância com os altos valores de UFC apresentados na Tabela 8 (2,57 × 10^6 UFC), refletindo a microbiota previamente estabelecida no solo.

Nas amostras coletadas aos 21 DAS (B1, B2 e B3), foi observada redução visual do crescimento microbiano em relação ao solo inicial, corroborando os resultados da Tabela 8, que demonstram diminuição das UFC nesse período. Esse comportamento pode estar relacionado ao processo de reorganização da microbiota após a implantação do experimento e ao estabelecimento inicial das plantas no substrato, fase em que ocorrem alterações nas condições

do solo e na atividade radicular (Van der Heijden; Bardgett; Van Straalen, 2008).

Aos 43 DAS (C1, C2 e C3), verificou-se aumento visual do crescimento microbiano em comparação à coleta anterior, indicando recuperação da população microbiana do solo. Esse padrão está de acordo com os valores de UFC apresentados na Tabela 8, principalmente nos tratamentos NF e N, que apresentaram maiores contagens nesse período.

Nas amostras correspondentes aos 78 DAS (D1, D2 e D3), observou-se crescimento microbiano mais intenso, acompanhado pelo aumento das UFC registrado na Tabela 8 para essa fase do cultivo. Esse incremento ao longo do ciclo pode estar associado à maior liberação de exsudatos radiculares em estádios mais avançados de desenvolvimento das plantas, favorecendo a proliferação de microrganismos na rizosfera (Philippot et al., 2013).

Dessa forma, a avaliação visual das placas apresentada na Figura 14 complementa os resultados obtidos na contagem de UFC, evidenciando alterações no crescimento microbiano do solo ao longo do desenvolvimento do feijoeiro.

REFERÊNCIAS

ADAMS, D. G.; DUGGAN, P. S. **Cyanobacteria–bryophyte symbioses**. Journal of Experimental Botany, v. 59, n. 5, p. 1047-1058, 2008.

ADESEMOYE, A. O.; KLOEPPER, J. W. **Plant–microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency**. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 85, p. 1–12, 2009.

ADDISON, H et al. **Two distinct ferredoxins are essential for nitrogen fixation by the iron nitrogenase in *Rhodobacter capsulatus***. Mbio, v. 15, n. 3, 2024.

ALLEN, M. B. **Simple conditions for growth of unicellular blue-green algae on plates**. J. Phtcol., v. 4, p. 1-4, 1968.

ALORI, E. T.; GLICK, B. R. **Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture**. Front. Microbio., v. 8, 2017.

AL-SHERIF, E. et al., **Use of Cyanobacteria and Organic Fertilizer Mixture as Soil Bioremediation**. J. Agric. & Environ. Sci., v. 15, n. 5, p. 794-799, 2015.

ALVAREZ, X. et al. **Biochemical characterization of Nostoc sp. exopolysaccharides and evaluation of potential use in wound healing**. Carbohydrate Polymers, v. 254, 2021.

AMMAR, E. E. et al., **A comprehensive overview of eco-friendly bio-fertilizers extracted from living organisms**. Environ. Sci. Pollut. Res. Int., v. 30, n. 53, p.113119–113137, 2023.

APHA-AWWA-WEF, ed., **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, in: 22nd ed., American Public Health Association (APHA), Washington, DC., 2012.

BACKER, R. et al. **Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmaps to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture**. Front.Plant Sci., v. 9, p. 1473, 2018.

BARBOSA, A. M et al. **Produção e Aplicações de Exopolissacarídeos Fúngicos**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 25, n. 1, p. 29-42, 2004.

BERRAQUERO, F. R.; BAYA, A. M.; CORMENZANA, A. R. **Establecimiento de índices para el estudio de la solubilización de fosfatos por bacterias del suelo**. Ars Pharmaceutica**,** Granada, v. 17, p. 399-406, sep. 1976.

BORSARI, A; DIAS, R. **Biodefensivos.** Mercado Brasileiro, Safra 2021/22. Sumário Executivo. S&P Commodity Insights e CropLife Brasil. 26 p. 2022.

BORSARI, A. Bioinsumos: **Mercado de R$ 17 bilhões até 2030**. Artigo de opinião. Vozes do Agro. Globo Rural. Disponível em: <https://globorural.globo.com/opiniao/vozes-doagro/noticia/2023/05/bioinsumos-mercado-de-r-17-bilhoes-ate-2030.ghtml >. Acesso em 11-11-24.

BRADFORD, M. M. **A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding**. Analytical Biochemistry, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 7 may, 1976.

CAMILO, S. Et al., **Root Traits Related with Drought and Phosphorus Tolerance in Common Bean (*Phaseolus vulgaris L.*).** Agronomy, v. 11, n. 3, p. 552, 2021.

CARTIN-CABALLERO, C. et al. **DSOF: A rapid method to determine the abundance of microalgae and methanotrophic bacteria in coculture using a combination of differential sedimentation, optical density, and fluorescence**. Bioengineering, v. 12, n. 9, p. 1000, 2025.

CHAMIZO, S. et al. **Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils**. Applied Soil Ecology, v. 132, p. 159–168, 2018.

CHAUDHARY, P. et al. **Biofertilizers in crop production: sustainable agriculture perspective.** Front. Plant Sci., v. 13, 2022.

CHITTORA, D. et al. Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. Biochem. Biophys. Rep., v. 13, n. 22, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Brasil deve produzir 299,27 milhões de toneladas de grãos na safra 2023/2024**. Disponível em: < https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5615-brasil-deve-produzir-299-27-milhoes-de-toneladas-de-graos-na-safra-2023-2024#:~:text=Para%20o%20feij%C3%A3o%2C%20a%20previs%C3%A3o,previs%C3%B5es%20para%20a%20terceira%20safra.>. Acesso em 09-11-24.

CROCE, R.; VAN AMERONGEN, H. **Natural strategies for photosynthetic light harvesting**. Nature Chemical Biology, v. 16, p. 492–501, 2020.

CRUZ, J. D. et al. **Bioprospecting for industrially relevant exopolysaccharide-producing cyanobacteria under Portuguese simulated climate**. Scientific Reports, v. 13, n. 13561, 2023.

DEBOWSKI, M.; KAZIMIEROWICZ, J.; ZIELINSKI, M. **Multi-sensing monitoring of the microalgae biomass**. Applied Sciences, v. 15, n. 13, p. 7324, 2025.

DE CARVALHO, M. C. S; SILVEIRA, P. M. **Adubação**. Embrapa. Disponível em: < https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao/adubacao>. Acesso em 11-11-24.

DERE, S; GUNES, T; SIVACI, R. **Spectrophotometric determination of chlorophyll *a*, *b* and total carotenoid contents of some algal species using different solvents**. Trend J. Bot, v. 22, p. 13-17, 1998.

DIAO, Y; YANG, Z. **Evaluation of morphological variation and biomass growth of *Nostoc commune* under laboratory conditions**. Journal of Environmental Biology, v. 35, p. 485-489, maio. 2014.

DOBROJAN, S.; DOBROJAN, G.; MELNIC, V. **Algal biofertilizers from the genus nostoc: a sustainable alternative for the cultivation of *echinaceae purpurea* l.** in the conditions of the republic of moldova. Scientific Papers. Series A. Agronomy, v. LXVIII, n. 2, 2025.

EL-SEEDI, H. R. Et al. **Review of Marine Cyanobacteria and the Aspects Related to Their Roles: Chemical, Biological Properties, Nitrogen Fixation and Climate Change**. Mar. Drugs., v. 21, n. 8, p. 439, 2023.

FAGERIA, N. K. **Nitrogen management in crop production**. CRC Press, 1st edition, p. 436, 2014. https://doi.org/10.1201/b17101.

FARDA, B. et al., **Isolation and characterization of cyanobacteria and microalgae from a sulfuric pond: Plant growth-promoting and soil bioconsolidation activities**. AIMS Microbiol., v. 10, n. 4, p. 944-972, 2024.

FEKETE, G., et al. **Comparative Analysis of Laboratory-Based and Spectroscopic Methods Used to Estimate the Algal Density of *Chlorella vulgaris*.** Microorganisms, v. 12, n. 6, p. 1050, 2024.

FERNANDES, V. DE O et al. **Ecologia de cianobactérias: Fatores promotores e consequências das florações**. Oecol. Bras., v. 13, n. 2, p. 247-258, 2009.

GUIDUCCI, R. do C. N; VIDAL, W. C. L; BERTIN, P. R. B**. Impacto econômico e ambiental *ex ante* de biofertilizante foliar com extratos de biomassa de cianobactéria da biodiversidade brasileira.** In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia rural, v. 62., 2024, Palmas. Bioeconomia, cadeias de valor e desafios do desenvolvimento regional: [anais...]. Brasília, DF: SOBER, 2024.

HAKKOUM, Z. et al. **Impact of a Soil Cyanobacteria Consortium-Based Bioinoculant on Tomato Growth, Yield, and Fruit Quality**. Plants, v. 14, n. 13, p.2034, 2025. https://doi.org/10.3390/plants14132034.

HERNÁNDEZ-REYES, B. M. et al. **Uso potencial de cianobacterias como biofertilizante para el cultivo de maíz azul en la Ciudad de México.** Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal, v. 10, n. 1, p. 13-27, 2019.

HOLZ, M. Et al., **Root and rhizosphere traits for enhanced water and nutrients uptake efficiency in dynamic environments**. Front. Plant. Sci., v. 15, 2024.

HOSMAN, M. E; ABO-SHADY, A. M; EL-NAGAR, M. M. F. **Treatment of broad bean seeds with algal suspensions to study their effects on certain growth and yield parameters**. Journal of Environmental Sciences, v. 49, n. 1, p. 1-7, 2020.

JOHANSEN, J. R.; CASAMATTA, D. A. **Recognizing cyanobacterial diversity through adoption of a new species paradigm.** Algological Studies, v.117, p. 71-93, 2005

KOMÁREK, J. et al. **Taxonomic classification of cianoprokaryotes (cyanobacterial genera) using a polyphasic approach**. Preslia, v. 86, p. 295-335, 2014.

KUMAR, K; MELLA-HERRERA, R.A; GOLDEN; J.W. **Cyanobacterial heterocysts**. Cold Spring Harb Perspect Biol., v. 2, n. 4, Apr., 2010.

KUMAR, D; KASTANEK, P, ADHIKARY, S. P. **Exopolysaccharides from Cyanobacteria and Microalgae and Their Commercial Application**. Current Science, v. 115, n. 2, p. 234-241, 2018.

LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. 2nd ed. Springer, 2008.

LAROCHE, C. **Exopolysaccharides from Microalgae and Cyanobacteria: Diversity of Strains, Production Strategies, and Applications**. Mar. Drugs., v. 20, n. 5, p. 336, 2022.

LICHTENTHALER, H.K; BUSCHMANN, C. **Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy**. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, v. 1, n. 1, p. F4.3.1-F4.3.8, ago. 2001.

LIU, F. et al., **Phosphate Solubilizing Microorganisms Increase Soil Phosphorus Availability: A Review**. Geomicrobiology Journal, v. 41, n. 1, p. 1-16, 2024.

LIU, Z. et al. **Response of heterocyst differentiation of Dolichospermum to different forms of nitrogen deficiency**. Harmful Algae, v. 139, 2024.

MACHADO, A. W. **Adubo - Fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP)**. Disponível em:< https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/adubacao-mineral/adubo---monoamonio-fosfato--map-_464782.html?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em 18-12-25.

MAGER, D. M.; THOMAS, A. D. **Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes**. Journal of Arid Environments, v. 75, n. 2, p. 91-97, 2010.

MANSOURI, H et al. **Study on the effect of sodium nitroprusside on growth and nitrogen fixation in blue-green algae *Nostoc linckia***. Iranian Journal of Science and Technology Transaction Science, v. 43, p.2083-2090, 2019.

MARÍN-MARÍN, C. A. et al. **Cianobacterias y microalgas como fuentes potenciales de biofertilizantes: una revisión**. Actu Biol., vol.46 n.120, 2024.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd ed. Academic Press, 2012.

MARSCHNER, P; CROWLEY, D; RENGEL, Z. **Rhizosphere interactions between microorganisms and plants govern soil processes.** Soil Biology and Biochemistry, v. 43, p. 229–238, 2011.

MEDINA, J. **Conheça 13 tipos de feijão cultivados no Brasil! Agropós**. Disponível em: < https://agropos.com.br/tipos-de-feijao/#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,Feij%C3%A3o%20vermelho>. Acesso em 11-11-24.

MOUGA, T. et al. **Unveiling the Cultivation of Nostoc sp. under Controlled Conditions**. Biology, v. 13, n. 5, 306, 2024.

NANNIPIERI, P. et al. **Microbial diversity and soil functions**. British Society of Soil Science: European Journal of Soil Science, v. 68, p. 1–26, 2017.

NAWAZ, T. et al. **Harnessing Nitrogen-Fixing Cyanobacteria for Sustainable Agriculture: Opportunities, Challenges, and Implications for Food Security**. Nitrogen, v. 6, n. 1, p. 16, 2025.

NAWAZ, T. et al. **Cyanobacteria: Harnessing the power of microorganisms for plant growth promotion, stress alleviation, and phytoremediation in the era of sustainable agriculture**. Plant Stress, v. 11, 2024.

NICOLETTI, M. **Chapter 10 - The nutraceutical potential of cyanobacteria**. The Pharmacological Potential of Cyanobacteria, Academic Press, p. 287-330, 2022.

PAGLI, C. et al., **Unlocking the potential of biocrust microorganisms in agriculture: cyanobacteria and heterotrophic bacteria with plant growth-promoting properties**. Front. Plant Sci., v. 16, 2025.

PAGELS, F. et al., **Extraction of Pigments from Microalgae and Cyanobacteria—A Review on Current Methodologies**. Appl. Sci., v. 11, n. 11, p. 5187, 2021.

PAIVA, C. A. DE O. et al. **Inoculantes e seus efeitos sobre as plantas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).** Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1168585/1/Inoculantes-e-seus-efeitos-sobre-as-plantas.pdf?utm_source=chatgpt.com >. Acesso em 28-01-25.

PAERL, H. W.; OTTEN, T.G. **Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls**. Environmental Microbiology, v. 65, p. 995–1010, 2013.

PARWANI, L.; BHATT, M.; SINGH, J**. Potential Biotechnological Applications of Cyanobacterial Exopolysaccharides.** Braz. Arch. Biol. Technol., v. 64, 2021.

PEREIRA, S. et al., **Complexity of cyanobacterial exopolysaccharides: composition, structures, inducing factors and putative genes involved in their biosynthesis and assembly**. FEMS Microbiology Reviews, v. 33, n. 5, p. 917–941, 2009.

PHILIPPOT, L. et al., Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. **Nature Reviews Microbiology**, v. 11, p. 789–799, 2013.

PRASANNA, R. et al. **Cyanobacterial inoculation in rice crop: growth and yield enhancement**. European Journal of Soil Biology, v. 58, p. 48–56, 2013.

PYLRO, V.S et al. **Data analysis for 16S microbial profiling from different benchtop sequencing platforms**. Journal of microbiological Methods, v. 107, p. 30-37, dez. 2014.

RAMAKRISHNAN, B et al. **Potential of microalgae and cyanobacteria to improve soil health and agricultural productivity: a critical view**. Environ. Sci., v. 2, p. 586-611, 2023.

RICHARDSON, A. E. et al. **Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere**. Plant and Soil, v. 321, p. 305–339, 2009.

RICHMOND, A.; HU, Q. **Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology**. 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2013.

RITCHIE, R. J. **Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents**. Photosynthesis Research, v. 89, n. 1, p. 27-41, 2006.

RODRÍGUES, H; FRAGA, R. **Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion**. Biotechnology Advances, v. 17, n. 4-5, p. 319-339, 1999.

RONGA, D. et al., **Microalgal Biostimulants and Biofertilisers in Crop Productions**. Agronomy, v. 9, n. 4, p. 192, 2019.

ROUHAEL, Y.; COLLA, G. **Biostimulants in agriculture**. Frontiers in Plant Science, v. 11, p. 40, 2020.

ROSALES LOAIZA, N. et al. **Comparación del crecimiento y Composición Bioquímica de cuatro cepas de *Nostoc* y *Anabaena* (Cyanobacteria, Nostocales) en relación con el nitrato de sodio**. Acta Biológica Colombiana, v. 21, n. 2, p. 347-354, 2016.

RONCERO-RAMOS, B. et al., **Assessing the influence of soil abiotic and biotic factors on *Nostoc commune* inoculation success**. Plant Soil, v. 444, p. 57-70, 2019.

ROSSI, F; DE PHILIPPIS, R. **Role of cyanobacterial exopolysaccharides in phototrophic biofilms and in complex microbial mats**. Life, v. 5, n. 2, p. 1218-1238, 2015.

SAMPAIO, A.C. **Cianobactérias: Endosimbioses primárias e outras associações**. Rev. Ciência Elem., v.10, n.2, 2022.

SANTANA, J.S et al. **Avaliação de NPK e doses de biofertilizante orgânico no crescimento do feijão-capuri**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 12, n. 5, p. 2877-2899, 30 nov. 2018.

SANTOS, et al., **Bactérias diazotróficas associadas a raízes de cana-deaçúcar: solubilização de fosfato inorgânico e tolerância à salinidade**. Biosci. J., Uberlândia, v. 28, Supplement 1, p. 142-149, Mar. 2012.

SEITZ, T. J.; SCHÜTTE, U. M. E.; DROWN, D. M. **Soil disturbance affects plant productivity via soil microbial community shifts**. Frontiers in Microbiology, v. 12, 2021.

SHARMA, S.B. et al. **Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils**. SpringerPlus, v. 2, n. 587, 2013.

SHAHZAD, M. et al. **Biofertilizers in sustainable agriculture: mechanisms, challenges and future perspectives**. Geosustainability, v. 3, n. 224, 2025.

SILVA, F. C. da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

SINGH, J. S et al., **Cyanobacteria: A precious bio-resource in agriculture, ecosystem, and environmental sustainability**. Frontiers in Microbiology, v. 7, p. 529, 2016.

SMITH, M.; RAO, I. M.; MERCHANT, A. **Source-Sink Relationships in Crop Plants and Their Influence on Yield Development and Nutritional Quality**. Front. Plant Sci., v. 9, 2018.

SOLOMON, W. et al., **Harnessing the Synergy of the Cyanobacteria-Plant Growth Promoting Bacteria for Improved Maize (*Zea mays*) Growth and Soil Health**. Sustainability, v. 15, n. 24, 2023.

SU, J et al. **Morphology, cell growth, and polysaccharide production of *Nostoc flagelliforme* in liquid suspension culture at different agitation rates**. Journal Applied Phycology, v. 20, p. 213-217, 2008.

TAIZ, L et al. **Plant Physiology and Development**. 6th ed. Sinauer Associates, 2017.

THOMAS, H. **Senescence, ageing and death of the wholeplant**. In: New Phytologist, v. 197, Issue 3, p. 685-1023, 2013.

TAMARU, Y. et al., **Crucial Role of Extracellular Polysaccharides in Desiccation and Freezing Tolerance in the Terrestrial Cyanobacterium *Nostoc commune.*** Appl. Environ. Microbiol., v. 71, n. 11, p. 7327 – 7333, 2005.

TIWARI, S. et al. **Photoacclimation strategies in cyanobacterial photosynthesis under dynamic light environments: implications in growth, fitness, and biotechnological applications**. Front. Microbiol., v. 16, 2025.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; BARDGETT, R. D.; VAN STRAALEN, N. M. **The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in errestrial ecosystems.** Ecology Letters, v. 11, p. 296–310, 2008.

VIDAL, D. R. A; BENÍTEZ, R. E. H; VANEGAS, J. **Efecto de la inoculación de cianobacterias en cultivos de interés comercial en zonas semiáridas de La Guajira-Colombia**. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales, v. 5, n. 1, p. 20-31, 2018.

WHITTON, B. A; POTTS, M. **The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space (2nd ed.)**. Springer Science & Business Media, 2012.

WOO, H. R. et al. **Plant leaf senescence and death – regulation by multiple layers of control and implications for aging in general**. Journal of Cell Science, v. 132, n. 1, 2019.

WU, S. et al. **Meta-Analysis of Abiotic Conditions Affecting Exopolysaccharide Production in Cyanobacteria**. Metabolites, v. 15, n. 2, p. 131, 2025.

XING, W.; LIU, J.; ZHANG, C. **HetF defines a transition point from commitment to morphogenesis during heterocyst differentiation in the cyanobacterium *Anabaena* sp. PCC 7120.** Molecular Microbiology, v. 120, n. 5, p. 740-753, 2023.

YADAV, P. et al. **Enhancing Biocrust Development and Plant Growth through Inoculation of Desiccation-Tolerant Cyanobacteria in Different Textured Soils**. Microorganisms, v. 7, n. 11, p. 10, 2023.

YU, H.; JIA, S.; DAI, Y. **Growth characteristics of the cyanobacterium Nostoc flagelliforme in photoautotrophic, mixotrophic and heterotrophic cultivation**. J.Appl. Phycol., v. 21, p. 127–133, 2009.

ZHANG, Y. et al., **Combined application of nitrogen-fixing cyanobacteria enhances rice growth and nutritional quality in saline environments**. Algal Research, v. 89, 2025.

TERCEIRA PARTE

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a cianobactéria da espécie *Pseudoaliinostoc soli* apresenta potencial para uso como biofertilizante, especialmente quando aplicada de forma integrada à adubação fosfatada mineral, promovendo efeitos positivos tanto sobre o desempenho agronômico do feijoeiro quanto sobre a dinâmica da comunidade microbiana do solo.

A etapa de pré-seleção das linhagens evidenciou variabilidade fisiológica e metabólica entre os isolados avaliados, destacando a linhagem UFLA 37 como a mais promissora para aplicações agrícolas. Embora essa linhagem não tenha apresentado os maiores valores de biomassa seca ou produção de exopolissacarídeos, seus elevados teores de clorofila *a* e de absorbância indicam alta eficiência fotossintética e rápido crescimento, características desejáveis para a produção de biomassa em menor tempo. Além disso, a capacidade consistente de solubilização de fosfato em meio sólido reforça o potencial funcional da linhagem UFLA 37 como microrganismo promotor da disponibilidade de fósforo no solo.

No experimento *in vivo*, a associação entre a biomassa de *Pseudoaliinostoc soli* e o fertilizante comercial (NF) promoveu maior crescimento vegetativo do feijoeiro, refletido em incrementos na altura das plantas, no diâmetro do caule, no número de folhas, no desenvolvimento do sistema radicular e no maior acúmulo de massa fresca e seca. Esses resultados indicam um efeito sinérgico entre o fertilizante comercial e a atividade biológica da cianobactéria, no qual os minerais prontamente disponíveis fornecido pelo fertilizante atua como fator determinante para o crescimento inicial, enquanto a biomassa de *Nostoc* exerce papel complementar, contribuindo para a melhoria do ambiente rizosférico e para o estímulo fisiológico das plantas.

Ao analisar conjuntamente os resultados biométricos de altura, diâmetro do caule e número de folhas, observa-se que o fertilizante comercial contribuiu de forma significativa para o crescimento vegetativo das plantas, promovendo valores superiores para essas variáveis em comparação ao tratamento que recebeu apenas a biomassa de *Nostoc*. A aplicação isolada da biomassa não resultou em aumentos significativos nessas características. No entanto, quando aplicada em conjunto com o fertilizante, observou-se potencialização do efeito sobre o crescimento das plantas. Dessa forma, o crescimento vegetativo do feijoeiro foi determinado

principalmente pela disponibilidade de nutrientes proveniente do fertilizante comercial, enquanto a biomassa da cianobactéria exerceu efeito complementar nas condições avaliadas.

Em relação à produtividade, observou-se que a aplicação combinada de biomassa de *Pseudoaliinostoc soli* e fertilizante favoreceu a formação de estruturas reprodutivas, resultando em maior número médio de vagens por planta. Por outro lado, o fertilizante aplicado de forma isolada contribuiu de maneira mais eficiente para o enchimento e a massa final dos grãos. Esses resultados evidenciam a atuação complementar dos tratamentos, na qual a biomassa de cianobactéria exerce papel mais relevante na promoção do crescimento vegetativo e na formação de vagens, enquanto o fertilizante comercial apresenta maior influência sobre o peso final dos grãos.

No que se refere à comunidade microbiana do solo, os resultados indicaram que a aplicação da biomassa de *Pseudoaliinostoc soli*, isolada ou associada ao fertilizante comercial, influencia a dinâmica microbiana ao longo do ciclo do feijoeiro. A recuperação mais rápida das unidades formadoras de colônias nos tratamentos que receberam biomassa sugere um efeito bioestimulante da cianobactéria sobre a microbiota do solo, possivelmente associado à liberação de exopolissacarídeos, compostos orgânicos e nutrientes. A observação da colonização da rizosfera pelas cianobactérias reforça o potencial de interação planta–microrganismo, indicando que *Nostoc* pode atuar não apenas como fonte indireta de nutrientes, mas também como modulador da atividade biológica do solo.

De forma geral, os resultados obtidos confirmam que a biomassa de *Pseudoaliinostoc soli* apresenta potencial para uso como biofertilizante, especialmente quando integrada à fertilização comercial, atuando como insumo complementar capaz de potencializar o crescimento das plantas e contribuir para a qualidade biológica do solo. No entanto, sua aplicação isolada não foi suficiente para maximizar o desempenho agronômico da cultura nas condições avaliadas, indicando que seu uso deve ser considerado como estratégia complementar dentro de sistemas de manejo integrado da fertilidade do solo. Assim, o presente estudo reforça a relevância da integração entre estratégias biológicas e químicas no manejo nutricional de culturas agrícolas, apontando a aplicação de cianobactérias como alternativa promissora para sistemas de produção mais sustentáveis.

Dessa forma, além de evidenciar o potencial da biomassa de *Pseudoaliinostoc soli* como biofertilizante, o presente estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a utilização de cianobactérias em sistemas agrícolas tropicais, fornecendo evidências experimentais sobre sua interação com a fertilização comercial e seus efeitos sobre o crescimento do feijoeiro e a microbiota do solo.

Como perspectiva para estudos futuros, recomenda-se a avaliação de diferentes doses de biomassa, formas e momentos de aplicação, bem como estudos de longo prazo sobre a persistência da cianobactéria no solo e seus efeitos cumulativos sobre a microbiota e a fertilidade do solo. Além disso, a aplicação de abordagens moleculares poderá contribuir para uma compreensão mais aprofundada das alterações na comunidade microbiana e dos mecanismos de interação entre cianobactéria, solo e planta. Esses avanços poderão contribuir para o aprimoramento do uso de cianobactérias como biofertilizantes e para a consolidação de estratégias biotecnológicas voltadas ao manejo sustentável da fertilidade do solo em sistemas agrícolas tropicais.