

CARACTERIZAÇÃO MOLECULAR E FUNCIONAL DE BACTÉRIAS DIAZOTRÓFICAS ISOLADAS DE AÇAÍ (*Euterpe oleracea*) E CAPIM-ELEFANTE BRS KURUMI (*Cenchrus purpureus*)

Fátima Luiza Backes Bamberg¹, Cleiton de Paula Soares^{2*}

RESUMO: As bactérias promotoras de crescimento vegetal apresentam importância na agricultura sustentável devido à capacidade de favorecer o desenvolvimento das plantas por diferentes mecanismos fisiológicos. O objetivo deste trabalho foi caracterizar molecularmente e avaliar o potencial funcional de isolados bacterianos endofíticos provenientes de açaí (*Euterpe oleracea*) e capim-elefante BRS Kurumi (*Cenchrus purpureus*), por meio da caracterização de mecanismos associados à promoção de crescimento vegetal. Foram avaliados 17 isolados quanto à fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fosfato de cálcio, óxido de zinco e fosfato de zinco, produção de sideróforos, produção de compostos indólicos e atividades enzimáticas celulolítica, proteolítica e pectinolítica. Todos os isolados apresentaram capacidade de fixação biológica de nitrogênio, enquanto os isolados 12 (*Klebsiella sp.*) e 13 (*Stenotrophomonas sp.*) destacaram-se pela elevada capacidade de solubilização de fosfato e zinco, enquanto os isolados 4 (*Pseudomonas sp.*), 5, 7 (*Enterobacter sp.*) e 1 (*Pseudomonas sp.*) apresentaram maior produção de compostos indólicos. O isolado 3 (*Bacillus sp.*) apresentou perfil enzimático distinto, sendo o único positivo para atividades celulolítica e pectinolítica, além de elevada atividade proteolítica. Os resultados demonstraram elevada diversidade funcional entre os isolados avaliados, evidenciando a ocorrência de mecanismos fisiológicos complementares associados à promoção de crescimento vegetal. Dessa forma, os isolados avaliados apresentam potencial para estudos posteriores em condições de planta, visando validar sua eficiência agrônômica e possível aplicação como inoculantes agrícolas.

Palavras-chave: bactérias endofíticas; promoção de crescimento vegetal; solubilização de nutrientes; bioinoculantes.

ABSTRACT: Plant growth-promoting bacteria are important in sustainable agriculture due to their ability to enhance plant development through different physiological

mechanisms. This study aimed to evaluate the functional potential of endophytic bacterial isolates obtained from açai (*Euterpe oleracea*) and BRS Kurumi elephant grass (*Cenchrus purpureus*) through the characterization of mechanisms associated with plant growth promotion. A total of 17 isolates were evaluated for biological nitrogen fixation, calcium phosphate, zinc oxide and zinc phosphate solubilization, siderophore production, indolic compound production, and cellulolytic, proteolytic, and pectinolytic enzymatic activities. All isolates showed the ability for biological nitrogen fixation, while isolates 12 (*Klebsiella* sp.) and 13 (*Stenotrophomonas* sp.) stood out for their high phosphate and zinc solubilization capacity. In contrast, isolates 4 (*Pseudomonas* sp.), 5, 7 (*Enterobacter* sp.), and 1 (*Pseudomonas* sp.) showed higher indolic compound production. Isolate 3 (*Bacillus* sp.) presented a distinct enzymatic profile, being the only isolate positive for cellulolytic and pectinolytic activities, in addition to showing high proteolytic activity. The results demonstrated high functional diversity among the evaluated isolates, evidencing the occurrence of complementary physiological mechanisms associated with plant growth promotion. Therefore, the evaluated isolates present potential for further studies under plant conditions in order to validate their agronomic efficiency and possible application as agricultural inoculants.

Keywords: endophytic bacteria; plant growth promotion; nutrient solubilization; bioinoculants.

1. Introdução

A crescente demanda por sistemas agrícolas mais sustentáveis tem impulsionado a busca por alternativas ao uso intensivo de insumos sintéticos, especialmente fertilizantes nitrogenados e fosfatados, cuja aplicação excessiva está associada a impactos ambientais significativos, como contaminação de solos e recursos hídricos, além da emissão de gases de efeito estufa. Nesse contexto, os bioinsumos emergem como uma estratégia viável para a construção de sistemas produtivos mais eficientes, e ambientalmente equilibrados, contribuindo para a redução da dependência de insumos externos e para o aumento da sustentabilidade agrícola (CRUZ et al., 2025; RIBEIRO et al., 2015).

Além dos benefícios ambientais, a adoção de bioinsumos está associada à manutenção da produtividade agrícola a longo prazo, favorecendo sistemas produtivos mais estáveis e menos dependentes de fertilizantes importados. Dessa forma, sua utilização contribui diretamente para a segurança alimentar, especialmente em cenários de intensificação agrícola e mudanças climáticas (CRUZ et al., 2025; ALMEIDA et al., 2016).

Entre os bioinsumos, destacam-se as bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV), que atuam no desenvolvimento das plantas por meio de diferentes mecanismos fisiológicos e bioquímicos, como a fixação biológica de nitrogênio (FBN), produção de fitormônios, síntese de sideróforos e solubilização de nutrientes, aumentando sua disponibilidade no solo e favorecendo a absorção pelas plantas (ALMEIDA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2015).

Bactérias endofíticas, que colonizam o interior dos tecidos vegetais sem causar danos ao hospedeiro, apresentam características associadas à promoção do crescimento vegetal, incluindo produção de enzimas, sideróforos e compostos reguladores do crescimento, além da atuação na disponibilização de nutrientes (RIBEIRO et al., 2015; ALMEIDA et al., 2016). Essas características favorecem sua utilização no desenvolvimento de bioinoculantes.

Apesar dos avanços no uso de microrganismos na agricultura, ainda existem lacunas relacionadas à prospecção e caracterização de isolados nativos adaptados a condições específicas, como os ecossistemas amazônicos. A exploração dessa diversidade microbiana amplia as possibilidades de seleção de microrganismos com maior eficiência e adaptação às condições locais (CRUZ et al., 2025).

O isolamento de bactérias associadas a espécies como o açaí (*Euterpe Oleracea*) e o capim BRS Kurumi (*Cenchrus purpureus*) representa uma abordagem promissora, considerando o potencial dessas plantas como reservatórios de microrganismos com características funcionais desejáveis. A identificação dos isolados com múltiplos mecanismos de atuação pode contribuir para o desenvolvimento de inoculantes adaptados às condições edafoclimáticas da região amazônica.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar molecularmente e avaliar o potencial funcional de bactérias diazotróficas endofíticas

associadas a plantas amazônicas, visando sua aplicação como promotoras de crescimento vegetal em sistemas agrícolas.

2. Material e Métodos

As atividades experimentais foram conduzidas utilizando bactérias endofíticas isoladas de açaí (*Euterpe oleracea*) e capim-elefante BRS Kurumi (*Cenchrus purpureus*). O isolamento dos microrganismos foi realizado previamente, não constituindo etapa do presente estudo, sendo os isolados obtidos no Instituto Federal de Roraima – *Campus* Novo Paraíso (IFRR-CNP).

A avaliação de características funcionais relacionadas à promoção do crescimento vegetal, sendo elas fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fosfatos inorgânicos, solubilização de óxido de zinco, produção de sideróforos, atividade celulolítica, produção de compostos indólicos bem como a caracterização molecular dos isolados, que foram realizados em parceria com a Embrapa Agrobiologia (RJ).

Para a padronização das análises, as mensurações dos ensaios de solubilização foram expressas por meio do índice de solubilização (IS), calculado com auxílio de paquímetro, conforme a relação $IS = A/B$, em que A corresponde ao diâmetro total (colônia + halo) e B ao diâmetro da colônia. Nos ensaios de solubilização, foi utilizada como controle positivo a estirpe PAL5 de *Gluconacetobacter diazotrophicus*, enquanto, para os ensaios de atividade enzimática, utilizou-se a estirpe BB1 de *Bacillus subtilis*, ambas provenientes da coleção de culturas da Embrapa Agrobiologia.

Todos os ensaios foram conduzidos em triplicata técnica, visando assegurar a confiabilidade dos resultados.

2.1 Fixação biológica de nitrogênio

A capacidade de fixação biológica de nitrogênio foi avaliada qualitativamente em condições *in vitro*, utilizando meios semissólidos isentos de nitrogênio (JNFB) (CATTELAN, 1999). Os isolados foram inoculados em frascos contendo 7 mL do respectivo meio de cultura e incubados a 30°C por 72 horas, em ausência de luz.

Após o período de incubação, foi avaliada a formação de uma película de crescimento na região próxima à superfície do meio, característica associada à

atividade diazotrófica. Cada isolado foi analisado em triplicata, sendo o ensaio repetido para confirmação dos resultados.

A reinoculação sucessiva foi realizada com o objetivo de verificar se o crescimento observado não estava associado ao uso de reservas internas de nitrogênio, além de confirmar a estabilidade dessa característica funcional, conforme descrito por Cattelan (1999).

2.2 Solubilização de fosfato inorgânico

A solubilização de fosfato de cálcio foi avaliada qualitativamente em meio NBRIP modificado (NAUTIYAL, 1999), contendo 3 g.L^{-1} de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ como fonte insolúvel. Para a realização dos ensaios, colônias isoladas foram cultivadas em meio líquido DYGS (RODRIGUES NETO et al., 1986) sob agitação (180 rpm) a 30°C por 24 horas. Em seguida, alíquotas de $10 \mu\text{L}$ foram inoculadas em placas contendo o meio sólido e mantidas em capela de fluxo laminar por aproximadamente 15 minutos para secagem.

A capacidade de solubilização foi avaliada pela formação de halos ao redor das colônias, sendo as medições realizadas no 12º dia após a inoculação e quantificada por meio do índice de solubilização (IS).

2.3 Solubilização de zinco

A solubilização de zinco foi avaliada qualitativamente em meio sólido Zinc Solubilizing Medium (HiMedia M2023), suplementado com 0,1 % (p/v) de óxido de zinco (ZnO) e fosfato de zinco ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$) como fonte insolúvel. Os isolados foram previamente cultivados em meio DYGS líquido sob agitação a 180 rpm a 30°C por 24 horas. Em seguida, alíquotas de $10 \mu\text{L}$ de cada cultura foram inoculadas na superfície das placas, em três repetições por isolado, utilizando a técnica de plaqueamento em gota. As placas foram incubadas a 30°C e a formação de halos translúcidos foi avaliada e quantificada por meio do índice de solubilização (IS).

2.4 Produção de sideróforos

Para a avaliação da produção de sideróforos, todo o material vítreo foi previamente tratado com solução de HCl a 5% (v/v) por, no mínimo, 48 horas, seguido de lavagem com água deionizada, visando à remoção de traços de ferro. A detecção

foi realizada pelo método do cromo azurol S (CAS), conforme Schwyn e Neilands (1987), com adaptações. Os isolados foram cultivados em meio líquido livre de ferro, sob agitação a 180 rpm, a 30 °C, por 24 horas. Em seguida, alíquotas de 10 µL foram inoculadas em placas contendo meio suplementado com 10% de solução CAS. As placas foram incubadas a 30 °C, e a formação de halo de descoloração ao redor das colônias foi monitorada por até cinco dias como indicativo da produção de sideróforos.

2.5 Atividade celulolítica

A atividade celulolítica foi determinada conforme metodologia descrita por Kasana et al. (2008). Os isolados foram cultivados em meio líquido DYGS sob agitação (180 rpm) a 30 °C por 24 horas. Posteriormente, alíquotas de 10 µL foram inoculadas em placas contendo meio sólido suplementado com carboximetilcelulose (CMC), em triplicata. As placas foram incubadas a 30°C por quatro dias.

Após o período de incubação, as placas foram coradas com solução de iodo, permitindo a visualização dos halos de degradação, sendo a atividade expressa pela relação entre o diâmetro total e o diâmetro da colônia.

2.6 Atividade proteolítica

A atividade proteolítica foi determinada conforme metodologia descrita por Saran et al. (2007). Os isolados foram cultivados em meio DYGS líquido sob agitação (180 rpm) a 30 °C por 24 horas. Alíquotas de 10 µL foram inoculadas em triplicata em placas contendo meio de leite desnatado (20 g.L⁻¹) suplementado com ágar e tampão fosfato de potássio 0,2 M (pH ajustado conforme crescimento otimizado para estirpe). As placas foram incubadas a 30 °C por quatro dias. Após o período de incubação, os diâmetros das colônias e dos halos de degradação da proteína foram mensurados.

2.7 Atividade pectinolítica

A atividade pectinolítica foi determinada conforme metodologia descrita por Bibi et al. (2018). Os isolados foram cultivados em meio DYGS líquido sob agitação (180 rpm) a 30 °C por 24 horas. Alíquotas de 10 µL foram inoculadas em triplicata em placas contendo meio PSAM (Pectinase Screening Agar Medium), com pectina cítrica (10 g.L⁻¹) como única fonte de carbono. As placas foram incubadas a 30 °C por quatro dias. Após o período de incubação, as placas foram inundadas com solução de iodo de Gram (aproximadamente 10 mL) e, após 5 minutos, a solução foi descartada. Os

diâmetros das colônias e dos halos de degradação foram medidos com paquímetro digital.

2.8 Produção de compostos indólicos

A produção de compostos indólicos foi quantificada pelo método colorimétrico de Salkowski em microplaca, conforme Sarwar e Kremer (1995). Os isolados foram cultivados em meio DYGS líquido sob agitação (180 rpm) a 30 °C por 24 horas para obtenção do pré-inóculo. Em seguida, alíquotas foram transferidas para meio DYGS suplementado com L-triptofano (100–200 $\mu\text{g.mL}^{-1}$) e incubadas a 30 °C sob agitação por 72 horas, em ausência de luz. Após centrifugação (10.000 rpm, 5 min), 150 μL do sobrenadante foram adicionados a 100 μL do reativo de Salkowski em microplaca de 96 poços. Após 30 minutos de incubação à temperatura ambiente no escuro, a absorbância foi lida a 540 nm. A quantificação foi realizada com base em curva padrão de ácido indol-3-acético (5–80 $\mu\text{g.mL}^{-1}$).

2.9 Caracterização taxonômica dos isolados

Para a caracterização taxonômica, os isolados bacterianos foram cultivados em meio DYGS (RODRIGUES NETO et al., 1986) por 24 horas, a 30 °C sob agitação de 180 rpm. Em seguida, 1 mL da suspensão bacteriana foi centrifugado a 12000 rpm por 5 minutos em centrífuga refrigerada Eppendorf Centrifuge 5810 R, sendo o pellet celular utilizado para extração do DNA genômico.

A extração do DNA foi realizada utilizando o kit comercial Wizard® Genomic DNA Purification (Promega, EUA), conforme as recomendações do fabricante. A concentração e a qualidade do DNA extraído foram avaliadas em espectrofotômetro NanoDrop® (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, EUA).

O DNA genômico obtido foi utilizado como molde para amplificação do gene 16S rRNA por meio da técnica de PCR, visando a posterior identificação taxonômica dos isolados bacterianos.

2.10 Amplificação do gene 16S rRNA

A amplificação do fragmento do gene 16S rRNA foi realizada utilizando os iniciadores 27F (5'–AGA GTT TAT CCT GCT CAG–3') (FURUSHITA et al., 2003) e

Amp2 (5'-AAG GAG GTA TCC ATC CGC A-3') (WANG et al., 1996), conforme descrito por Videira et al. (2009).

As reações de PCR foram realizadas em volume final de 50 µL, utilizando o sistema GoTaq® G2 Flexi DNA Polymerase (Promega, EUA). A mistura reacional foi composta por: tampão GoTaq® Flexi 5X (10 µL), MgCl₂ (25 mM; 3 µL), dNTPs (10 mM; 1,25 µL), iniciador 27F (1,0 µL), iniciador Amp2 (1,0 µL), GoTaq® G2 Flexi DNA Polymerase (5 U.µL⁻¹; 0,5 µL), DNA genômico (~50 ng; 10 µL) e água ultrapura estéril para completar o volume final.

As amplificações foram conduzidas em termociclador Bio-Rad T100™ Thermal Cycler, programado com as seguintes condições: desnaturação inicial a 94 °C por 3 minutos, seguida de 30 ciclos de 94 °C por 1 minuto (desnaturação), 60 °C por 45 segundos (anelamento) e 72 °C por 2 minutos (extensão), com extensão final a 72 °C por 5 minutos e manutenção a 4 °C.

Os produtos de PCR foram submetidos à eletroforese em gel de agarose a 0,8% (p/v), em tampão TAE 1X, a 90 V por aproximadamente 1 hora e 30 minutos. Em seguida, o gel foi corado com brometo de etídeo (0,5 µg.mL⁻¹) e visualizado sob luz ultravioleta em fotodocumentador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização taxonômica dos isolados

Os gêneros bacterianos identificados neste estudo (Tabela 1), *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Stenotrophomonas*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Phytobacter* e *Agrobacterium* são frequentemente associados a mecanismos funcionais relacionados à interação planta-microrganismo, como produção de fitormônios, sideróforos, enzimas extracelulares, solubilização de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio. A diversidade taxonômica observada reforça a ampla distribuição de bactérias associadas ao desenvolvimento vegetal em espécies nativas e gramíneas forrageiras (MEHMOOD et al., 2023; KHAN et al., 2022; ZHAO et al., 2024; RANA et al., 2020).

Tabela 1. Caracterização taxonômica parcial dos isolados bacterianos obtida por sequenciamento do gene 16S rRNA e análise de similaridade no banco de dados do NCBI.

Isolados	Origem	Gênero Identificado
1	<i>Euterpe Oleracea</i>	<i>Pseudomonas sp.</i>
2	<i>Euterpe Oleracea</i>	<i>Pseudomonas sp.</i>
3	<i>Euterpe Oleracea</i>	<i>Bacillus sp.</i>
4	<i>Euterpe Oleracea</i>	<i>Pseudomonas sp.</i>
5	<i>Euterpe Oleracea</i>	Não identificado
6	<i>Euterpe Oleracea</i>	<i>Stenotrophomonas sp.</i>
7	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Enterobacter sp.</i>
8	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Stenotrophomonas sp.</i>
9	<i>Cenchrus purpureus</i>	Não identificado
10	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Stenotrophomonas sp.</i>
11	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Enterobacter sp.</i>
12	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Klebsiella sp.</i>
13	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Stenotrophomonas sp.</i>
14	<i>Cenchrus purpureus</i>	Não identificado
15	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Phytobacter sp.</i>
16	<i>Cenchrus purpureus</i>	<i>Agrobacterium sp.</i>
17	<i>Cenchrus purpureus</i>	Não identificado

A identificação taxonômica parcial dos isolados bacterianos foi realizada por sequenciamento do gene 16S rRNA e análise de similaridade utilizando a ferramenta BLASTn no banco de dados do National Center for Biotechnology Information (NCBI).

Espécies do gênero *Pseudomonas* destacam-se principalmente pela produção de sideróforos e atividade antagonista contra fitopatógenos, enquanto bactérias do

gênero *Bacillus* são frequentemente relacionadas à produção de enzimas extracelulares e elevada resistência ambiental devido à formação de endósporos (ALATTAS et al., 2024; PATANI et al., 2024). Os isolados de *Stenotrophomonas* apresentam associação com assimilação de nutrientes e produção de metabólitos extracelulares (SHARMA; PANDEY; CHAUHAN, 2025), enquanto *Enterobacter* e *Klebsiella* são amplamente descritos pela capacidade de fixação biológica de nitrogênio e produção de compostos indólicos (ANDRÉS-BARRAO et al., 2017; YANG; YANG, 2020). Já os gêneros *Phytobacter* e *Agrobacterium* apresentam forte associação endofítica e elevada interação com tecidos vegetais, sendo frequentemente encontrados em ambientes rizosféricos e endofíticos (RANA et al., 2020; HWANG; YU; LAI, 2017).

A ocorrência de múltiplos mecanismos simultâneos (Tabela 2) em determinados isolados reforça o caráter multifuncional das BPCV, considerado um dos principais critérios para seleção de inoculantes eficientes (BASHAN; DE-BASHAN, 2010; HUNGRIA et al., 2010; RIBEIRO et al., 2015). Microrganismos com múltiplas funções apresentam maior capacidade de interação com a planta, atuando de forma integrada na nutrição e no desenvolvimento vegetal (COMPANT et al., 2010; SOUMARE et al., 2020).

Estudos conduzidos com bactérias diazotróficas associadas a gramíneas tropicais demonstram elevada diversidade genética e funcional desses microrganismos, com capacidade simultânea de fixação biológica de nitrogênio, produção de fitormônios e solubilização de nutrientes, resultando em incremento no crescimento vegetal e na eficiência de absorção de nutrientes (RIBEIRO et al., 2019; DA SILVA RIBEIRO et al., 2026).

Bactérias endofíticas tendem a apresentar maior eficiência em comparação a microrganismos rizosféricos, devido à sua capacidade de colonizar tecidos internos e estabelecer interações mais estáveis com o hospedeiro (COMPANT et al., 2010; SANTOS et al., 2019).

Tabela 2. Caracterização funcional e identificação taxonômica parcial dos isolados bacterianos originários de *Euterpe oleracea* e *Cenchrus purpureus*.

Isolado	Gênero Identificado	Sideróforo	Fosfato de Zinco	Zinco	Fosfato de Cálcio	Proteolítica	PSAM	CMC	FBN	AIA
1	<i>Pseudomonas sp.</i>	+	+	+	+	-	-	-	+	+++
2	<i>Pseudomonas sp.</i>	+	-	-	+	-	-	-	+	+
3	<i>Bacillus sp.</i>	+	+	-	+	+	+	+	+	+
4	<i>Pseudomonas sp.</i>	-	+	+	+	-	-	-	+	+++
5	Não identificado	+	+	-	+	-	-	-	+	+++
6	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	+
7	<i>Enterobacter sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	+++
8	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	+
9	Não identificado	+	+	+	+	+	-	-	+	+
10	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	++
11	<i>Enterobacter sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	++
12	<i>Klebsiella sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	+
13	<i>Stenotrophomonas sp.</i>	+	+	+	+	+	-	-	+	+
14	Não identificado	+	+	+	+	+	-	-	+	+
15	<i>Phytobacter sp.</i>	+	+	-	+	-	-	-	+	+
16	<i>Agrobacterium sp.</i>	+	+	+	+	-	-	-	+	+
17	Não identificado	+	+	+	+	+	-	-	+	+
Controle +		+	+	+	+	+	+	+	+	-

3.2 Fixação biológica de nitrogênio

A avaliação qualitativa da fixação biológica de nitrogênio demonstrou que todas os 17 isolados bacterianos apresentaram formação de película superficial em meio semissólido livre de nitrogênio (Tabela 2), indicando potencial diazotrófico.

A formação da película próxima à superfície do meio semissólido (Figura 1) confirma o comportamento típico de bactérias diazotróficas microaerofílicas, já que a enzima nitrogenase apresenta alta sensibilidade ao oxigênio e requer baixa tensão de O_2 para sua atividade (CATTELAN, 1999). Resultados semelhantes foram reportados por Ribeiro et al., (2019), da Silva Ribeiro et al., (2026) e Döbereiner (1992) que observaram que bactérias diazotróficas isoladas de gramíneas tropicais apresentam elevada eficiência funcional e contribuem significativamente para o crescimento vegetal e absorção de nutrientes.

Figura 1. Formação de película aerotóxica em meio JNFB por isolados bacterianos diazotróficos, indicada pelas setas, evidenciando crescimento característico de bactérias fixadoras de nitrogênio em condições microaerofílicas.



Fonte: Autoria própria (2026).

A FBN é um dos principais mecanismos de promoção de crescimento vegetal, pois permite a conversão do N_2 atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados sintéticos (SUN et al., 2021). Além disso, bactérias diazotróficas frequentemente apresentam mecanismos complementares, como produção de AIA, solubilização de nutrientes e produção de sideróforos (SOUMARE et al., 2020), o que também foi observado neste estudo, em

que todos os isolados com FBN positiva apresentaram outros mecanismos funcionais (Tabela 2).

Segundo Kebede (2021), a FBN contribui para a redução de impactos ambientais e dos custos de produção agrícola. Dessa forma, a presença universal desse mecanismo entre os isolados reforça o potencial agronômico dessas bactérias endofíticas nativas da Amazônia para o desenvolvimento de bioinoculantes mais eficientes e adaptados às condições regionais (DE LIMA et al., 2024).

3.3 Solubilização de fosfato inorgânico

Os resultados obtidos para a solubilização de fosfato de cálcio demonstraram elevada variabilidade entre os 17 isolados bacterianos avaliados, evidenciando diferenças significativas no potencial de disponibilização de fósforo insolúvel (Tabela 3). O isolado 13 (*Stenotrophomonas sp.*) apresentou o maior índice de solubilização (IS = 3,02), superando inclusive o controle positivo, *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAL5, que apresentou IS de 3,01, indicando elevado potencial funcional dessa bactéria, juntamente com o isolado 12 (*Klebsiella sp.*).

A formação dos halos de solubilização observada em meio NBRIP confirma visualmente a capacidade das estirpes em disponibilizar fósforo insolúvel, conforme ilustrado na Figura 2. O halo translúcido ao redor das colônias indica a ação metabólica das bactérias sobre o fosfato insolúvel presente no meio, refletindo sua capacidade de solubilização e disponibilização desse nutriente às plantas.

Tabela 3. Avaliação *in vitro* da capacidade de solubilização de fosfato inorgânico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi.

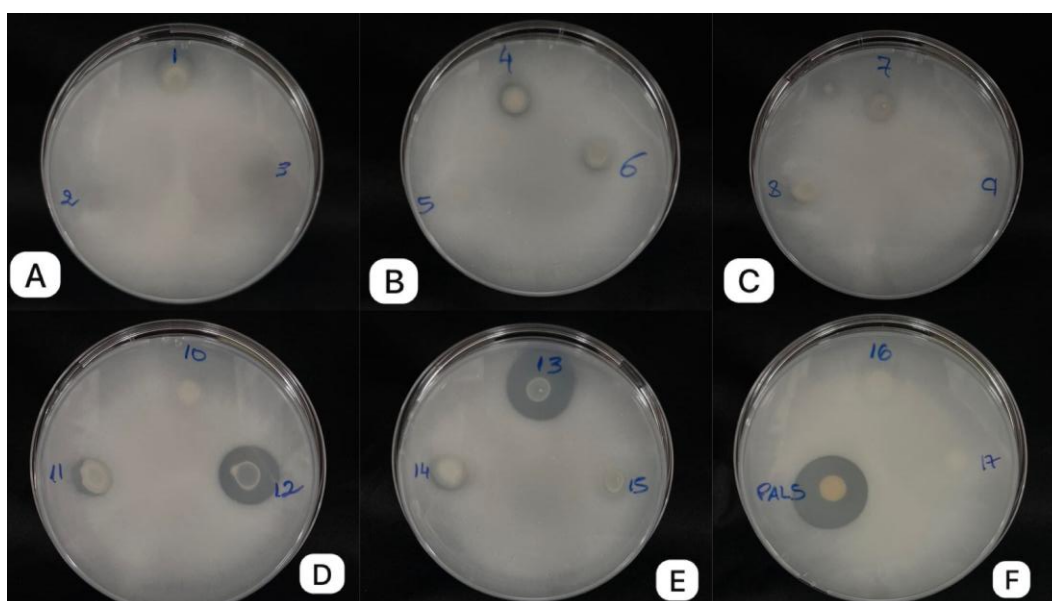
Isolados	SOLUBILIZAÇÃO DE FOSFATO DE CÁLCIO		
	Colônia	Colônia + Halo	Índice de Solubilização
1	8,58	12,83	1,49
2	5,41	5,89	1,08
3	5,76	-	0
4	7,46	11,84	1,58
5	6,92	11,99	1,73
6	8,63	12,34	1,42
7	7,15	11,60	1,62
8	8,77	14,90	1,69
9	7,39	14,04	1,89
10	7,06	11,20	1,58
11	8,99	14,21	1,58
12	7,51	15,52	2,06
13	6,23	18,87	3,02
14	9,27	13,07	1,40
15	9,01	10,19	1,13
16	8,67	13,23	1,52
17	6,62	11,84	1,78
Controle +	7,11	21,43	3,01

O índice de solubilização (I.S.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de solubilização) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula $\text{I.S.} = A/B$. *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAL5 foi utilizada como controle positivo no teste de solubilização de fosfato *in vitro*.

O fósforo é um dos macronutrientes mais limitantes à produtividade agrícola, principalmente em solos tropicais altamente intemperizados, como grande parte dos solos brasileiros, onde esse elemento permanece adsorvido a compostos de ferro, alumínio e cálcio, tornando-se indisponível às plantas (RIBEIRO et al., 2015). Desta forma, bactérias solubilizadoras de fosfato atuam na liberação desse nutriente por meio da produção de ácidos orgânicos, prótons e enzimas fosfatases, que reduzem o pH do meio e promovem a dissolução dos fosfatos insolúveis (NAUTIYAL, 1999; ABREU et al., 2013). Esse processo representa uma das principais estratégias

biológicas para aumento da eficiência do uso de fósforo no solo, favorecendo o desenvolvimento radicular, maior crescimento vegetativo e melhor desempenho produtivo (RAWAT et al., 2020; ALORI; GLICK; BABALOLA, 2017; TIAN et al., 2021).

Figura 2 - Formação de halo de solubilização de fosfato inorgânico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) por bactérias endofíticas diazotróficas em meio de cultura sólido NBRIP, evidenciando a capacidade de disponibilização de fósforo insolúvel. Sendo (A) isolados 1, 2 e 3; (B) isolados 4, 5 e 6; (C) isolados 7, 8 e 9; (D) isolados 10, 11 e 12; (E) isolados 13, 14 e 15; (F) isolados 16, 17 e controle positivo; O halo translúcido ao redor da colônia indica a atividade solubilizadora dos isolados avaliados.



Fonte: Autoria própria (2026).

Resultados semelhantes foram observados por Videira (2012), ao avaliar bactérias diazotróficas associadas à cana-de-açúcar, verificando que isolados com elevada capacidade de solubilização de fosfato também apresentaram melhor desempenho em outros mecanismos de promoção de crescimento vegetal, reforçando o caráter multifuncional dessas bactérias. Da mesma forma, Bahia (2011) relatou que estirpes com maior índice de solubilização apresentaram melhor potencial para uso como inoculantes, especialmente quando associadas à produção de AIA e sideróforos.

3.4 Solubilização de zinco

Os resultados demonstraram elevada variabilidade entre os isolados quanto à capacidade de solubilização de zinco, indicando diferenças fisiológicas na mobilização desse micronutriente.

Para a solubilização em meio contendo ZnO (Tabela 4), o isolado 12 (*Klebsiella* sp.) apresentou o maior índice de solubilização (IS = 3,33), superando inclusive o controle positivo, PAL5 (IS = 2,82). A formação dos halos observada nesse meio confirma visualmente a atividade metabólica das bactérias sobre a fonte insolúvel de zinco, conforme ilustrado na Figura 3.

Tabela 4. Avaliação *in vitro* da capacidade de solubilização zinco (ZnO) por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi.

Isolados	SOLUBILIZAÇÃO DE ZINCO		
	Colônia	Colônia + Halo	Índice de Solubilização
1	12,52	21,50	1,71
2	-	-	-
3	-	-	-
4	13,74	20,86	1,51
5	-	-	-
6	7,87	16,76	2,12
7	5,11	6,93	1,35
8	7,03	9,87	1,40
9	7,71	9,87	1,28
10	6,80	8,97	1,31
11	8,52	12,90	1,51
12	7,35	24,53	3,33
13	7,39	19,59	2,65
14	14,71	21,09	1,43
15	-	-	-
16	6,69	7,62	1,13
17	6,63	8,97	1,35
Controle +	10,12	28,56	2,82

O índice de solubilização (I.S.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de solubilização) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula $I.S. = A/B$. *Gluconacetobacter diazotrophicus* PAL5 foi utilizada como controle positivo no teste de solubilização de zinco *in vitro*.

Já na solubilização de fosfato de zinco ($Zn_3(PO_4)_2$) (Tabela 5 e Figura 4), o isolado 14 (*Phytobacter* sp.) apresentou o maior índice de solubilização (IS = 2,27), superando

o controle positivo (IS = 2,14). Esses resultados indicam respostas distintas conforme a fonte de ZnO utilizada (Figura 3).

Tabela 5. Avaliação *in vitro* da capacidade de solubilização de fosfato de zinco ($Zn_3(PO_4)_2$) por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi.

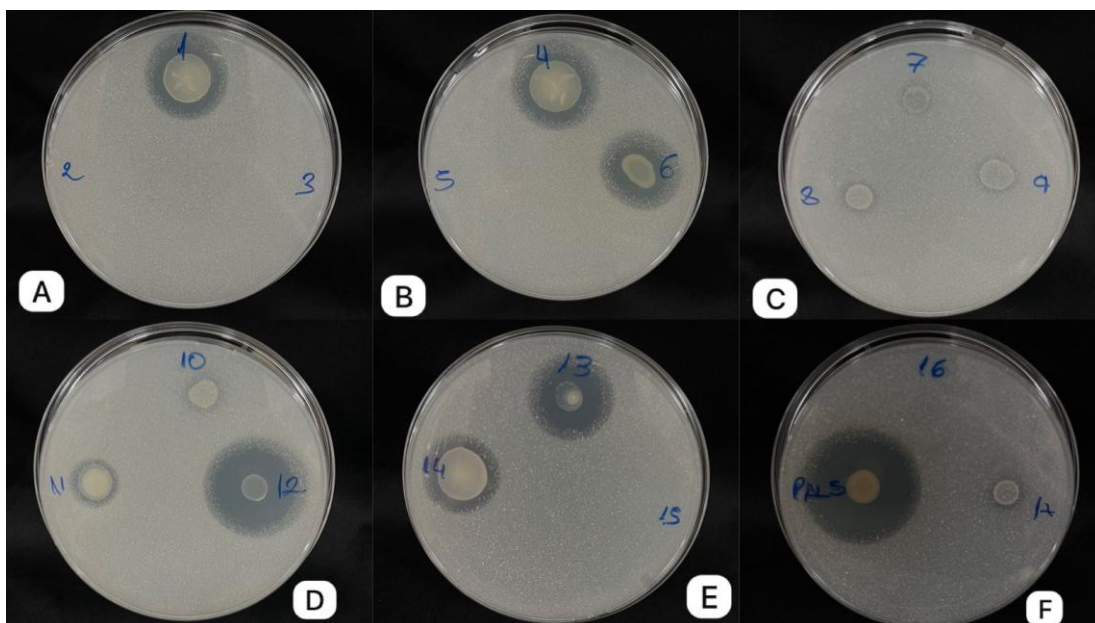
Isolados	SOLUBILIZAÇÃO DE FOSFATO DE ZINCO		
	Colônia	Colônia + Halo	Índice Enzimático
1	10,87	14,05	1,29
2	-	-	-
3	9,42	13,25	1,40
4	8,87	13,8	1,55
5	7,71	9,36	1,21
6	8,17	17,13	2,09
7	9,05	12,03	1,32
8	8,73	12,44	1,42
9	9,00	11	1,22
10	8,95	10,9	1,21
11	10,69	12,38	1,15
12	8,50	15,83	1,86
13	7,64	12,22	1,59
14	9,48	21,55	2,27
15	8,77	16,85	1,92
16	8,94	-	0
17	9,34	-	0
Controle +	11,03	23,7	2,14

O Índice enzimático (I.E.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de atividade) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula $I.E. = A/B$. Para o teste de produção de sideróforos, o halo de descoloração no meio CAS indica a capacidade da estirpe em quelar ferro. O controle positivo utilizado foi a estirpe *Bacillus subtilis* BB1.

O zinco é um micronutriente essencial ao metabolismo vegetal, participando da síntese de proteínas, atividade enzimática, produção de clorofila e desenvolvimento radicular. Em solos tropicais, sua disponibilidade é frequentemente limitada devido à

baixa solubilidade e à forte adsorção aos minerais do solo, reduzindo sua absorção pelas plantas. Desta forma, bactérias solubilizadoras de zinco atuam por meio da produção de ácidos orgânicos, prótons e metabólitos quelantes que promovem a liberação do Zn e aumentam sua disponibilidade para absorção radicular (KAMRAN et al., 2017; COSTEROUSSÉ et al., 2017; RANI et al., 2023).

Figura 3 - Formação de halo de solubilização de óxido de zinco (ZnO) por bactérias endofíticas diazotróficas em meio de cultura sólido, evidenciando a capacidade de disponibilização de zinco insolúvel. Sendo (A) isolados 1, 2 e 3; (B) isolados 4, 5 e 6; (C) isolados 7, 8 e 9; (D) isolados 10, 11 e 12; (E) isolados 13, 14 e 15; (F) isolados 16, 17 e controle positivo; O halo translúcido ao redor da colônia indica a atividade solubilizadora dos isolados avaliados.



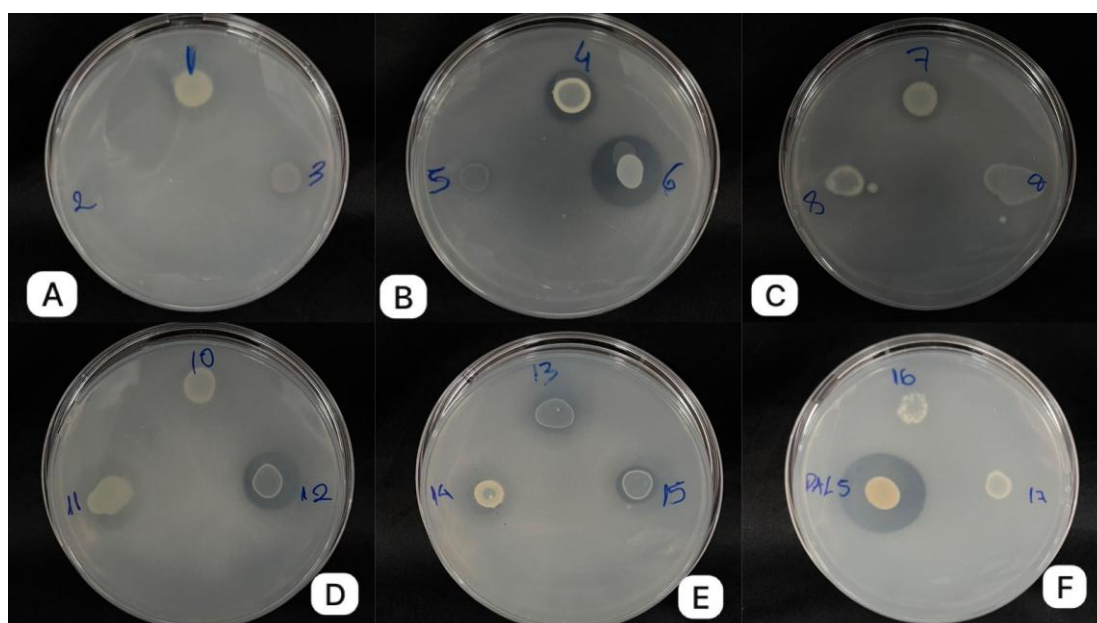
Fonte: Autoria própria (2026).

Segundo Srithaworn et al. (2023), bactérias com elevada capacidade de solubilização de zinco apresentam potencial direto na promoção do crescimento vegetal, aumentando a disponibilidade desse micronutriente e favorecendo o desenvolvimento inicial das plantas. Kamran et al., (2017) observaram incremento no crescimento e no teor de zinco em trigo inoculado com bactérias solubilizadoras, demonstrando o potencial agrônomo desses microrganismos na biofortificação e no aumento da produtividade.

Sultan et al., (2023), ao avaliarem bactérias solubilizadoras de zinco em milho (*Zea mays*), observaram efeitos positivos no crescimento vegetal e no aproveitamento

nutricional, reforçando a aplicabilidade desses microrganismos como biofertilizantes. Os resultados indicam que os isolados avaliados apresentam diferenças fisiológicas na mobilização de fontes insolúveis de zinco, sugerindo que esse mecanismo ocorre de forma dependente do substrato utilizado.

Figura 4 - Formação de halo de solubilização de fosfato de zinco ($Zn_3(PO_4)_2$) por bactérias endofíticas diazotróficas em meio de cultura sólido, evidenciando a capacidade de solubilização dessa fonte insolúvel de zinco. Sendo (A) isolados 1, 2 e 3; (B) isolados 4, 5 e 6; (C) isolados 7, 8 e 9; (D) isolados 10, 11 e 12; (E) isolados 13, 14 e 15; (F) isolados 16, 17 e controle positivo; A presença do halo ao redor da colônia indica o potencial funcional dos isolados na disponibilização do micronutriente às plantas.



Fonte: Autoria própria (2026).

3.5 Produção de sideróforos

A produção de sideróforos foi avaliada pela formação de halo de descoloração no meio suplementado com CAS (Chrome Azurol S), caracterizado pela mudança da coloração ao redor das colônias bacterianas (Figura 5), indicando a capacidade de quelar ferro do meio. A descoloração do meio ao redor das colônias indica a remoção do ferro complexado ao corante, evidenciando a produção de metabólitos com alta afinidade por Fe^{3+} e seu potencial funcional na disponibilização desse micronutriente.

Entre as estirpes avaliadas (Tabela 6), o isolado 9 (*Stenotrophomonas* sp.) apresentou o maior índice de solubilização ($IS = 2,91$), superando o controle positivo,

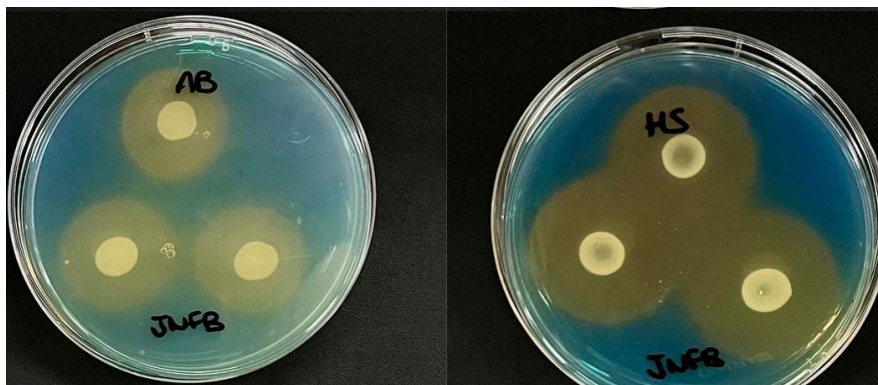
Bacillus subtilis BB1 (IS = 2,78), seguida do isolado 8 (IS = 2,53) e 10 (IS = 2,34) do mesmo gênero (*Stenotrophomonas* sp.), demonstrando elevada eficiência na produção de sideróforos.

Tabela 6. Avaliação *in vitro* da capacidade de produção de sideróforo por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi.

Isolados	SIDERÓFORO		
	Colônia	Colônia + Halo	Índice de Solubilização
1	19,26	23,29	1,20
2	8,81	12,04	1,36
3	7,63	10,64	1,39
4	-	-	-
5	7,42	9,0	1,21
6	8,51	-	0
7	6,41	7,93	1,23
8	8,38	21,26	2,53
9	7,77	22,67	2,91
10	8,18	19,21	2,34
11	7,86	-	0
12	6,99	-	0
13	8,33	-	0
14	9,32	-	0
15	9,06	-	0
16	8,06	13,71	1,70
17	8,08	14,39	1,78
Controle +	9,32	25,95	2,78

O índice de solubilização (I.S.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de descoloração) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula $I.S. = A/B$. O controle positivo utilizado no teste de produção de sideróforos foi a estirpe *Bacillus subtilis* BB1.

Figura 5 - Formação de halo de descoloração em meio CAS (Chrome Azurol S) indicativo da produção de sideróforos por bactérias endofíticas diazotróficas.



Fonte: Autoria própria (2026).

Os sideróforos são compostos de baixo peso molecular produzidos principalmente em condições de limitação de ferro, atuando na solubilização e captação desse elemento essencial ao metabolismo microbiano e vegetal. Em solos tropicais, o ferro frequentemente se encontra em formas pouco disponíveis, tornando esse mecanismo importante para a nutrição vegetal e para o estabelecimento das bactérias promotoras de crescimento (TIMOFEEVA; GALYAMOVA; SEDYKH, 2022).

Além da melhoria na disponibilidade de ferro, a produção de sideróforos também contribui para o controle biológico de fitopatógenos, pois reduz a disponibilidade desse nutriente para microrganismos competidores na rizosfera (GHOSH et al., 2020).

3.6 Atividade celulolítica

A atividade celulolítica foi avaliada em meio contendo carboximetilcelulose (CMC), por meio da formação de halo de degradação ao redor das colônias, indicando a produção de enzimas celulasas capazes de hidrolisar compostos celulósicos (Tabela 7). Entre os isolados avaliados, apenas o 3 (*Bacillus sp.*) apresentou resultado positivo, com índice enzimático (I.E.) de 3,02, demonstrando capacidade de degradação da celulose.

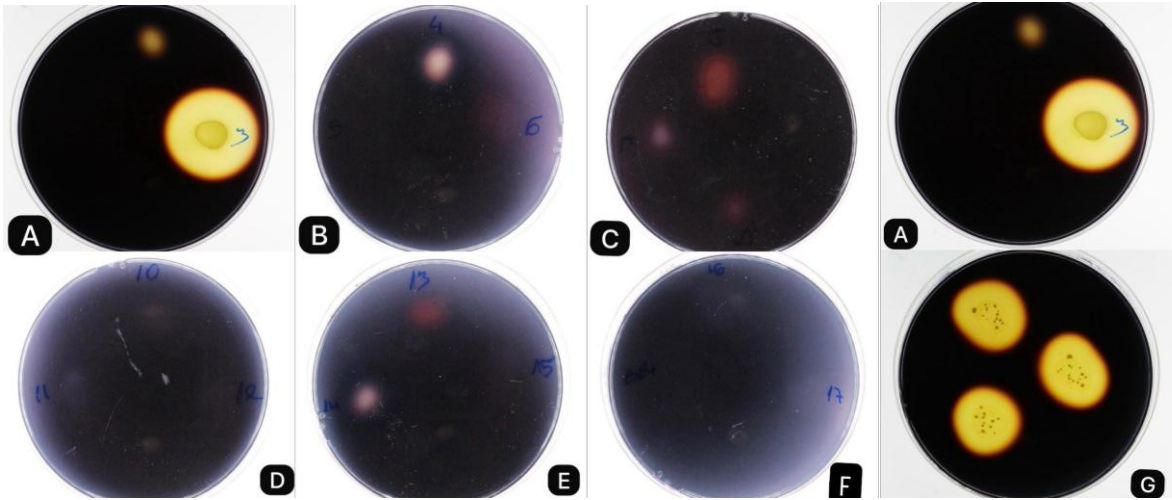
Tabela 7. Avaliação *in vitro* da atividade celulolítica (CMC) de bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi.

Isolados	Atividade Celulolítica		
	Colônia	Colônia + Halo	Atividade Enzimática
3	10,63	32,19	3,02
Controle +	12,24	30,31	18,07

O índice enzimático (I.E.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de degradação) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula I.E. = A/B. O controle positivo utilizado foi a estirpe *Bacillus subtilis* BB1.

A formação do halo observada ao redor da colônia confirma visualmente a atividade celulolítica do isolado, conforme ilustrado na Figura 6. Essa resposta indica a produção de enzimas extracelulares responsáveis pela degradação da celulose presente no meio, evidenciando a capacidade metabólica da bactéria em atuar sobre compostos orgânicos complexos.

Figura 6 - Avaliação da atividade celulolítica em meio contendo carboximetilcelulose (CMC) por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi. Sendo (A) isolados 1, 2 e 3; (B) isolados 4, 5 e 6; (C) isolados 7, 8 e 9; (D) isolados 10, 11 e 12; (E) isolados 13, 14 e 15; (F) isolados 16 e 17; (G) controle positivo (*Bacillus subtilis* BB1). A formação de halo translúcido ao redor das colônias indica a produção de celulasas e a capacidade de degradação da carboximetilcelulose.



Fonte: Autoria própria (2026).

As celulasas são enzimas responsáveis pela hidrólise da celulose em moléculas menores, como oligossacarídeos e glicose, sendo importantes na ciclagem de nutrientes e na decomposição da matéria orgânica no solo (BHAT, 2000). Segundo Doi (2008), microrganismos produtores de celulase contribuem diretamente para a mineralização de resíduos vegetais e para a liberação de nutrientes disponíveis às plantas, favorecendo a fertilidade do solo e o equilíbrio microbiológico da rizosfera.

Grata (2020) destaca que a atividade celulolítica também favorece a colonização bacteriana em ambientes vegetais, especialmente em bactérias endofíticas, pois a produção dessas enzimas auxilia na adaptação e no estabelecimento da interação planta-microrganismo.

A baixa frequência dessa atividade entre os isolados indica que a degradação de celulose não constitui um mecanismo predominante no grupo avaliado, mas pode representar diferencial ecológico para determinados isolados.

3.7 Atividade proteolítica

A atividade proteolítica foi avaliada em meio sólido pela formação de halo de degradação ao redor das colônias, indicando a produção de enzimas proteases capazes de hidrolisar compostos proteicos presentes no substrato (Tabela 8).

O isolado 3 (*Bacillus sp.*) apresentou o maior índice enzimático (I.E. = 2,69), seguida pelo isolado 6 (*Stenotrophomonas sp.*) (I.E. = 2,62), todas com desempenho superior ao controle positivo, *Bacillus subtilis* BB1 (I.E. = 2,30).

Tabela 8. Avaliação *in vitro* da atividade proteolítica de bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi.

Isolados	PROTEOLÍTICA		
	Colônia	Colônia + Halo	Índice Enzimático
1	-	-	-
2	-	-	-
3	12,81	34,52	2,69
4	-	-	-
5	-	-	-
6	13,45	35,28	2,62
7	14,78	27,05	1,83
8	14,60	33,64	2,30
9	14,60	28,32	1,93
10	14,22	29,11	2,04
11	14,46	22,21	1,53
12	17,28	23,96	1,38
13	16,49	32,37	1,96
14	17,87	33,08	1,85
15	-	-	-
16	-	-	-
17	13,85	33,41	2,41
Controle +	17,43	40,23	2,30

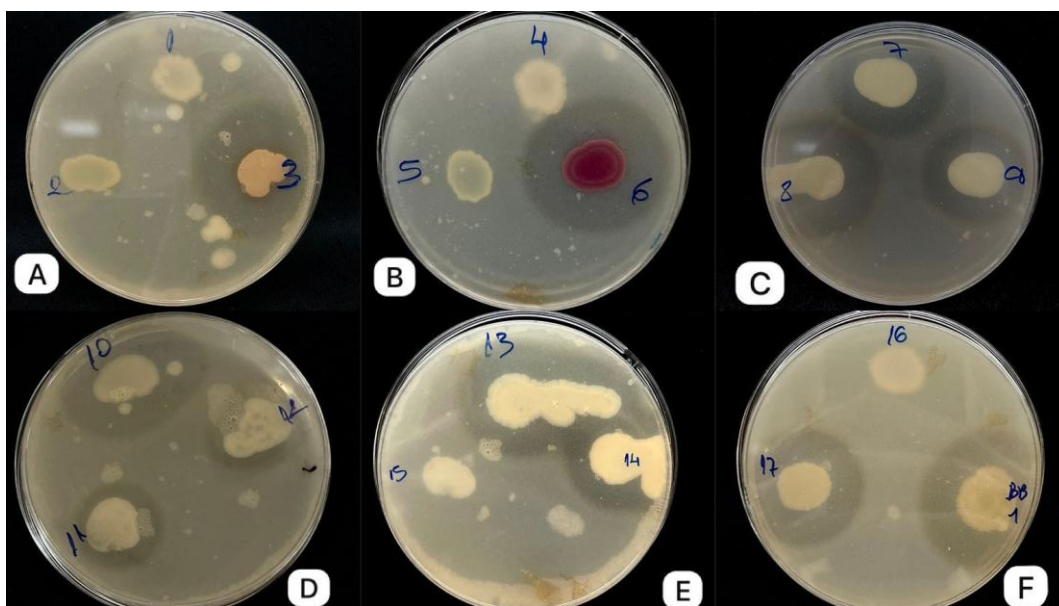
O índice enzimático (I.E.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de degradação) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula $I.E. = A/B$. O controle positivo utilizado foi a estirpe *Bacillus subtilis* BB1.

A formação dos halos observada confirma visualmente a atividade proteolítica dos isolados, conforme ilustrado na Figura 7. O halo translúcido ao redor das colônias evidencia a ação das proteases extracelulares sobre o substrato proteico presente no meio, demonstrando a capacidade bacteriana de degradação e aproveitamento de compostos orgânicos complexos.

As proteases são enzimas responsáveis pela hidrólise de proteínas em peptídeos e aminoácidos menores, contribuindo diretamente para a ciclagem de nutrientes e

para a mineralização da matéria orgânica no solo, favorecendo a disponibilização de nitrogênio e outros nutrientes às plantas (EVANGELISTA, 2017).

Figura 7 - Formação de halo de degradação em meio sólido, indicativo da atividade proteolítica por bactérias endofíticas diazotróficas. Sendo (A) isolados 1, 2 e 3; (B) isolados 4, 5 e 6; (C) isolados 7, 8 e 9; (D) isolados 10, 11 e 12; (E) isolados 13, 14 e 15; (F) isolados 16, 17 e controle positivo.



Fonte: Autoria própria (2026).

A ocorrência de atividade proteolítica em diferentes isolados indica capacidade variável de utilização de compostos proteicos como fonte nutricional e participação potencial na transformação de matéria orgânica.

Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam o potencial das bactérias endofíticas avaliadas para atuação na ciclagem de nutrientes, no aproveitamento de compostos orgânicos e na promoção de crescimento vegetal, reforçando sua importância na prospecção de bioinoculantes para culturas de interesse agrônomo.

3.8 Atividade pectinolítica

A atividade pectinolítica foi avaliada em meio contendo pectina (PSAM), por meio da formação de halo de degradação ao redor das colônias, indicando a produção de enzimas pectinases capazes de hidrolisar compostos pécnicos presentes na parede celular vegetal (Tabela 9). Entre os isolados avaliados, apenas o *Bacillus* sp. (3) apresentou resultado positivo, com índice enzimático (I.E.) de 2,86, superando o

controle positivo, *Bacillus subtilis* BB1 (I.E. = 2,47), demonstrando elevado potencial funcional para degradação de substâncias pécicas.

Tabela 9. Avaliação *in vitro* da atividade pectinolítica (PSAM) de bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açáí e capim-elefante BRS Kurumi.

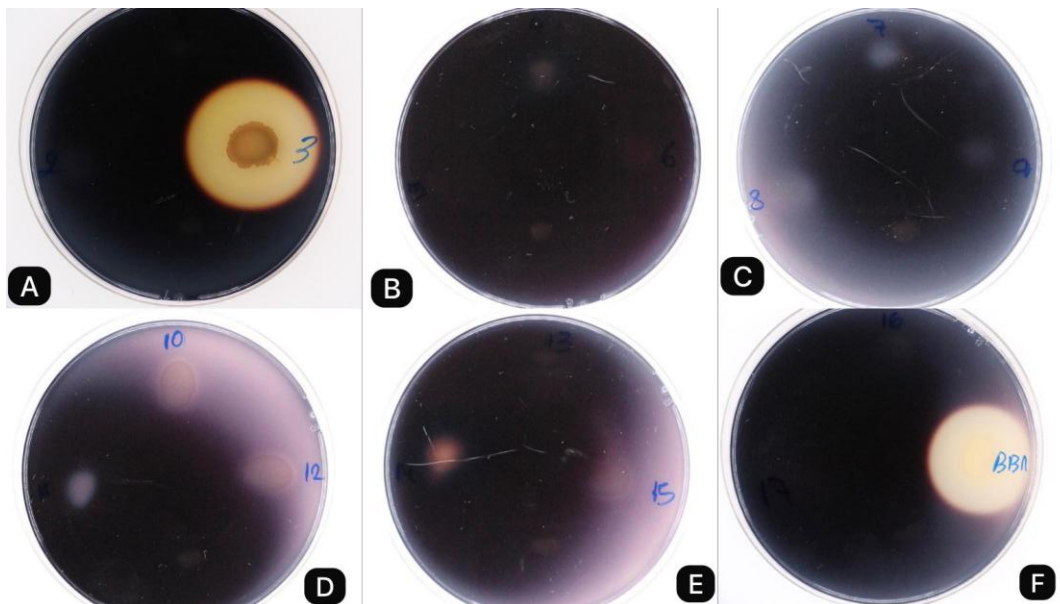
Isolado	PSAM		
	Colônia	Colônia + Halo	Atividade Enzimática
3	11,29	32,29	2,86
Controle +	12,24	30,31	2,47

O índice enzimático (I.E.) foi calculado pela relação entre o diâmetro total (colônia + halo de degradação) e o diâmetro da colônia, conforme a fórmula $I.E. = A/B$. O controle positivo utilizado foi a estirpe *Bacillus subtilis* BB1.

A formação do halo translúcido observada ao redor da colônia confirma visualmente a atividade pectinolítica, conforme ilustrado na Figura 8. Esse resultado evidencia a produção de enzimas extracelulares responsáveis pela degradação da pectina presente no meio de cultivo, indicando importante capacidade metabólica associada à colonização vegetal.

As pectinases são enzimas responsáveis pela degradação de substâncias pécicas da lamela média e da parede celular vegetal, atuando na decomposição da matéria orgânica e no processo de colonização por microrganismos endofíticos (EVANGELISTA, 2017). Segundo Shrestha et al., (2021), bactérias produtoras de pectinase apresentam maior capacidade de interação com tecidos vegetais, favorecendo a penetração e o estabelecimento da associação planta-microrganismo.

Figura 8 - Formação de halo de degradação em meio contendo pectina (PSAM), indicativo da atividade pectinolítica por bactérias endofíticas diazotróficas. Sendo (A) isolados 1, 2 e 3; (B) isolados 4, 5 e 6; (C) isolados 7, 8 e 9; (D) isolados 10, 11 e 12; (E) isolados 13, 14 e 15; (F) isolados 16, 17 e controle positivo.



Fonte: Autoria própria (2026).

Dessa forma, a atividade pectinolítica observada demonstra o potencial do isolado do gênero *Bacillus* sp. na degradação de compostos estruturais vegetais e na interação planta-bactéria.

3.9 Produção de compostos indólicos

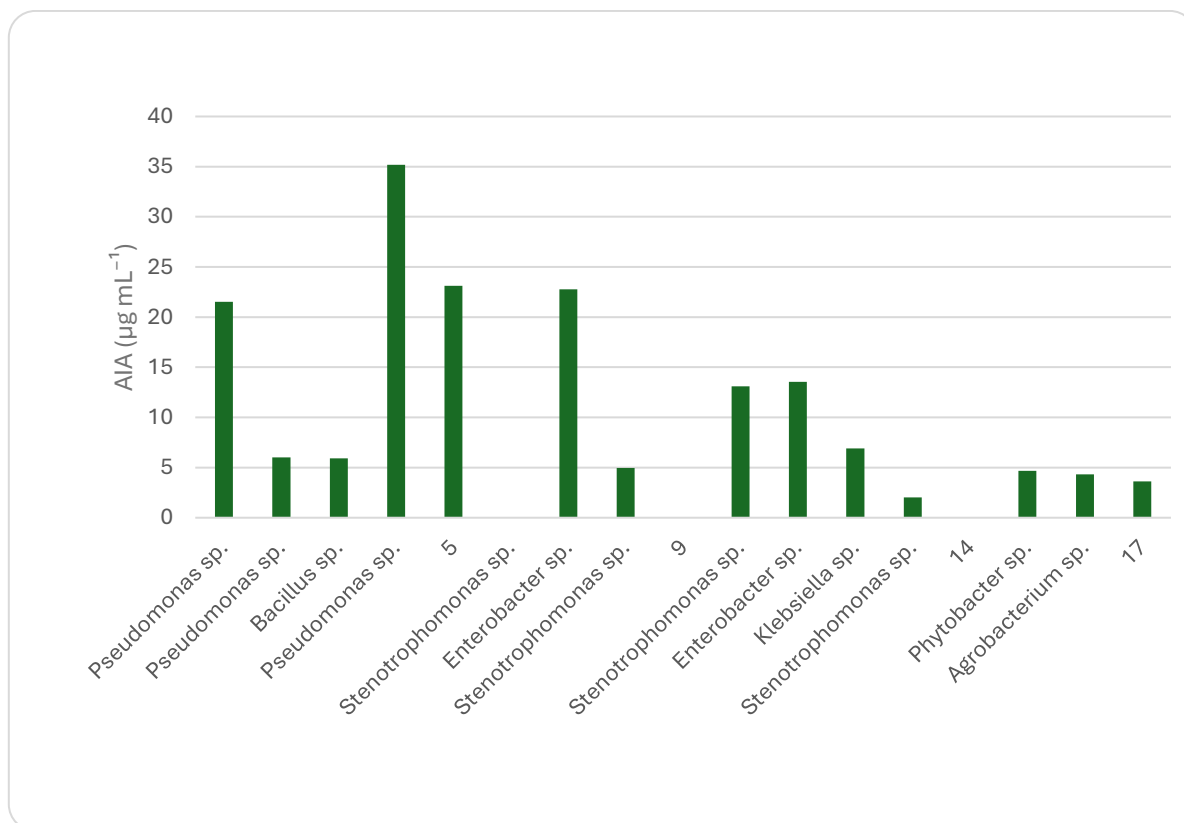
A produção de compostos indólicos foi avaliada pela quantificação de ácido indolacético (AIA), principal auxina de origem microbiana associada à promoção de crescimento vegetal (Figura 9).

O isolado 4 (*Pseudomonas* sp.) apresentou a maior produção de AIA ($35,19 \mu\text{g.mL}^{-1}$), seguida pelo isolado 5 ($23,13 \mu\text{g.mL}^{-1}$), 7 (*Enterobacter* sp., $22,77 \mu\text{g.mL}^{-1}$) e 1 (*Pseudomonas* sp., $21,53 \mu\text{g.mL}^{-1}$), evidenciando elevado potencial para promoção do crescimento vegetal. A intensidade da coloração observada na reação com o reagente de Salkowski corroborou os resultados quantitativos obtidos, sendo mais evidente nos isolados com maiores concentrações de AIA (Figura 10).

A classificação da produção de AIA na Tabela 1 foi realizada com base em intervalos fixos de $10 \mu\text{g.mL}^{-1}$, definidos como: + ($\leq 10 \mu\text{g.mL}^{-1}$), ++ ($10,1-20 \mu\text{g.mL}^{-1}$)

e +++ ($> 20 \mu\text{g}.\text{mL}^{-1}$). Essa abordagem permite destacar isolados com alta produção absoluta de AIA.

Figura 9 - Produção de compostos indólicos (AIA) por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi, expressa em $\mu\text{g}.\text{mL}^{-1}$.



A produção de compostos indólicos foi determinada por método colorimétrico utilizando o reagente de Salkowski, com leitura em espectrofotômetro e quantificação expressa em $\mu\text{g}.\text{mL}^{-1}$ de ácido indolacético (AIA). Valores positivos indicam capacidade de produção de auxinas bacterianas, associadas à promoção do crescimento vegetal.

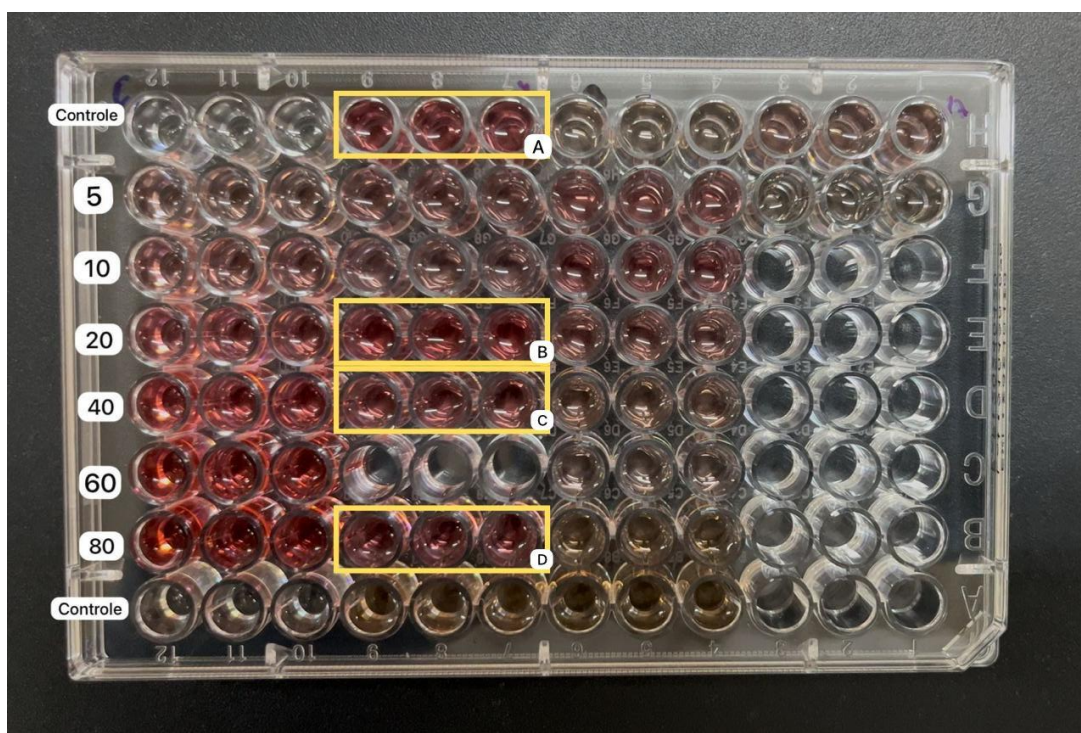
O AIA é um dos principais fitormônios produzidos por bactérias promotoras de crescimento vegetal, atuando diretamente no alongamento celular, formação de raízes laterais, desenvolvimento radicular e maior absorção de água e nutrientes pelas plantas (KESWANI et al., 2020). Segundo Li et al. (2018), a produção bacteriana de AIA ocorre principalmente a partir do metabolismo do triptofano e representa um dos mecanismos mais importantes na interação planta-microrganismo, favorecendo o estabelecimento da colonização endofítica e rizosférica.

Observou-se que a maior produção de AIA foram predominantemente proveniente de isolados de açaí, destacando-se os isolados 1, 4 (*Pseudomonas sp.*) e 5, com

exceção da isolado 7 (*Enterobacter sp.*), obtido de capim-elefante BRS Kurumi. A predominância de maiores valores em isolados provenientes de açaí sugere influência do ambiente de origem na expressão desse mecanismo, hipótese que pode ser explorada em avaliações futuras sob condições controladas.

Etesami e Glick (2024) destacam que a produção de AIA por bactérias endofíticas influencia diretamente a arquitetura radicular e aumenta a capacidade adaptativa das plantas frente a estresses bióticos e abióticos, além de potencializar a eficiência de absorção de nutrientes.

Figura 10. Quantificação da produção de compostos indólicos (AIA) por bactérias endofíticas diazotróficas isoladas de açaí e capim-elefante BRS Kurumi, pelo método colorimétrico de Salkowski em microplaca.



A coloração rósea indica a produção de ácido indolacético (AIA), sendo sua intensidade proporcional à concentração produzida. Os isolados destacados apresentaram maior capacidade de síntese de auxinas bacterianas sendo elas 4 (B), 5 (C), 7 (D) e 1 (A) evidenciando maior potencial para promoção do crescimento vegetal e desenvolvimento radicular.

Fonte: Autoria própria (2026).

4. CONCLUSÃO

Os isolados bacterianos endofíticos obtidos de açaí (*Euterpe oleracea*) e capim-elefante BRS Kurumi (*Cenchrus purpureus*) apresentaram elevada diversidade funcional, com ocorrência de mecanismos associados à promoção de crescimento vegetal.

Todos os isolados apresentaram capacidade de fixação biológica de nitrogênio, enquanto os isolados 12 (*Klebsiella sp.*) e 13 (*Stenotrophomonas sp.*) destacaram-se pela elevada capacidade de solubilização de fosfato e zinco, enquanto os isolados 4 (*Pseudomonas sp.*), 5, 7 (*Enterobacter sp.*) e 1 (*Pseudomonas sp.*) apresentaram maior produção de compostos indólicos. O isolado 3 (*Bacillus sp.*) apresentou perfil enzimático distinto, sendo o único positivo para atividades celulolítica e pectinolítica, além de elevada atividade proteolítica. Os resultados evidenciam diferenças fisiológicas importantes entre os isolados e demonstram a ocorrência de mecanismos funcionais complementares, relevantes para a interação planta-microrganismo e disponibilização de nutrientes.

Dessa forma, os isolados avaliados apresentam potencial para estudos posteriores em condições de planta, visando validar sua eficiência agronômica e futura aplicação como inoculantes agrícolas.

Referências

- ABREU, C. S. *et al.* Biossolubilização de fósforo por bactérias endofíticas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1087–1095, 2013.
- ALATTAS, H. *et al.* Harnessing *Pseudomonas* spp. for sustainable plant crop protection. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, 2024.
- ALMEIDA, C. V. *et al.* Bactérias promotoras de crescimento vegetal e sua aplicação na agricultura sustentável. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 39, n. 2, p. 215–224, 2016.

ALORI, E. T.; GLICK, B. R.; BABALOLA, O. O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, art. 971, 2017.

ANDRÉS-BARRAO, C. *et al.* Complete genome sequence analysis of *Enterobacter* sp. SA187, a plant multi-stress tolerance promoting endophytic bacterium. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, 2017.

BASHAN, Y.; DE-BASHAN, L. E. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — a critical assessment. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 77–136, 2010.

BHAT, M. K. Cellulases and related enzymes in biotechnology. **Biotechnology Advances**, v. 18, n. 5, p. 355–383, 2000.

BIBI, F. *et al.* Characterization of antagonistic bacteria from pear rhizosphere and their potential for the control of phytopathogenic fungi. **Current Microbiology**, v. 75, n. 7, p. 885–895, 2018.

CATTELAN, A. J. **Métodos quantitativos para determinação de características bioquímicas e fisiológicas associadas com bactérias promotoras do crescimento vegetal**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. n. 139. (Série Documentos).

COMPANT, S.; CLÉMENT, C.; SESSITSCH, A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 669–678, 2010.

COSTEROUSSÉ, B. *et al.* Identification of Heterotrophic Zinc Mobilization Processes among Bacterial Strains Isolated from Wheat Rhizosphere (*Triticum aestivum* L.). **Applied and Environmental Microbiology**, v. 84, 2017.

CRUZ, A. P. *et al.* O uso de bioinsumos na agricultura brasileira: uma revisão. **Revista Mirante**, v. 18, n. 1, p. 1–15, 2025.

DE LIMA, J. *et al.* Expanding agricultural potential through biological nitrogen fixation: Recent advances and diversity of diazotrophic bacteria. **Australian Journal of Crop Science**, v. 18, n. 6, 2024.

DÖBEREINER, J. History and new perspectives of diazotrophs in association with non-leguminous plants. **Symbiosis**, v. 13, p. 1–13, 1992.

DOI, R. H. Cellulases of mesophilic microorganisms. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1125, p. 267–279, 2008.

ETESAMI, H.; GLICK, B. R. Bacterial indole-3-acetic acid: a key regulator for plant growth, plant-microbe interactions, and agricultural adaptive resilience. **Microbiological Research**, v. 281, art. 127602, 2024.

EVANGELISTA, D. **Estudos funcionais e estruturais de pectinases e xilanases com potencial para aplicações biotecnológicas**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

FURUSHITA, M. *et al.* Similarity of *Vibrio* species isolated from diseased fish to *Vibrio harveyi* and *Vibrio campbellii*. **Systematic and Applied Microbiology**, v. 26, p. 436–440, 2003.

GHOSH, S.; BERA, T.; CHAKRABARTY, A. Microbial siderophore – A boon to agricultural sciences. **Biological Control**, v. 144, art. 104214, 2020.

GRATA, K. Determining cellulolytic activity of microorganisms. **Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology**, v. 25, p. 133–143, 2020.

HUNGRIA, M. *et al.* Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. **Plant and Soil**, v. 331, p. 413–425, 2010.

HWANG, H.; YU, M.; LAI, E. M. Agrobacterium-mediated plant transformation: biology and applications. **The Arabidopsis Book**, v. 2017, 2017.

KAMRAN, S. *et al.* Contribution of Zinc Solubilizing Bacteria in Growth Promotion and Zinc Content of Wheat. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, 2017.

KASANA, R. C. *et al.* A rapid and easy method for the detection of microbial cellulases on agar plates using Gram's iodine. **Current Microbiology**, v. 57, p. 503–507, 2008.

KEBEDE, E. Biological nitrogen fixation in legumes: A review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 717–734, 2021.

KESWANI, C. *et al.* Auxins of microbial origin and their use in agriculture. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 104, p. 8549–8565, 2020.

KHAN, A. *et al.* Bacillus spp. as bioagents: uses and application for sustainable agriculture. **Biology**, v. 11, n. 12, 2022.

MEHMOOD, N. *et al.* Multifaceted impacts of plant-beneficial Pseudomonas spp. in managing various plant diseases and crop yield improvement. **ACS Omega**, v. 8, p. 22296–22295, 2023.

NAUTIYAL, C. S. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. **FEMS Microbiology Letters**, v. 170, p. 265–270, 1999.

PATANI, A. *et al.* Recent advances in Bacillus-mediated plant growth enhancement: a paradigm shift in redefining crop resilience. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 40, p. 1–13, 2024.

RANA, K. *et al.* Endophytic microbes: biodiversity, plant growth-promoting mechanisms and potential applications for agricultural sustainability. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 113, p. 1075–1107, 2020.

RANI, N. *et al.* Molecular Mechanistic of Zn-Solubilizing Bacteria for Agronomic Eminence: Recent Updates and Futuristic Development. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 44, p. 1337–1351, 2023.

RAWAT, P. *et al.* Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 49–68, 2020.

RIBEIRO, C. M.; CARDOSO, E. J. B. N.; SILVA, M. C. P. Bactérias endofíticas e sua aplicação na promoção do crescimento vegetal. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3, p. 1401–1414, 2015.

RODRIGUES NETO, J.; MALAVOLTA JÚNIOR, V. A.; VICTOR, O. Meio simples para o isolamento e cultivo de Xanthomonas campestris pv. citri tipo B. **Summa Phytopathologica**, v. 12, p. 16, 1986.

SANTOS, R. M. *et al.* Interação entre cana-de-açúcar e bactérias promotoras de crescimento vegetal. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 2, p. 789–804, 2019.

- SARAN, S.; ISAR, J.; SAXENA, R. K. A modified method for the detection of microbial proteases on agar plates using skim milk agar. **Journal of Microbiological Methods**, v. 70, n. 3, p. 561–563, 2007.
- SARWAR, M.; KREMER, R. J. Determination of bacterially derived auxins using a microplate method. **Letters in Applied Microbiology**, v. 20, p. 282–285, 1995.
- SCHWYN, B.; NEILANDS, J. B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. **Analytical Biochemistry**, v. 160, p. 47–56, 1987.
- SHARMA, P.; PANDEY, R.; CHAUHAN, N. *Stenotrophomonas maltophilia* promotes wheat growth by enhancing nutrient assimilation and rhizosphere microbiota modulation. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 13, 2025.
- SOUMARE, A. *et al.* Exploiting biological nitrogen fixation: A route towards a sustainable agriculture. **Plants**, v. 9, n. 8, art. 1011, 2020.
- SRITHAWORN, M. *et al.* Zinc solubilizing bacteria and their potential as bioinoculant for growth promotion of green soybean (*Glycine max* L. Merr.). **PeerJ**, v. 11, 2023.
- SULTAN, A.; GEBREEL, H.; YOUSSEF, H. Biofertilizer effect of some zinc dissolving bacteria free and encapsulated on *Zea mays* growth. **Archives of Microbiology**, v. 205, 2023.
- SUN, W.; SHAHRAJABIAN, M.; CHENG, Q. Nitrogen fixation and diazotrophs – A review. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 26, n. 4, p. 2834–2845, 2021.
- TIAN, J. *et al.* Roles of phosphate solubilizing microorganisms from managing soil phosphorus deficiency to mediating biogeochemical P cycle. **Biology**, v. 10, n. 2, art. 158, 2021.
- TIMOFEEVA, A.; GALYAMOVA, M.; SEDYKH, S. Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. **Plants**, v. 11, n. 16, art. 2119, 2022.
- VIDEIRA, S. S. *et al.* Genetic diversity and plant growth promoting traits of diazotrophic bacteria isolated from sugarcane plants grown in Brazil. **Plant and Soil**, v. 321, p. 111–126, 2009.

YANG, L.; YANG, K. Biological function of *Klebsiella variicola* and its effect on the rhizosphere soil of maize seedlings. **PeerJ**, v. 8, 2020.

ZHAO, Y. *et al.* A comprehensive comparative genomic analysis revealed that plant growth promoting traits are ubiquitous in strains of *Stenotrophomonas*. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, 2024.