

# Efeitos da aplicação de *Bradyrhizobium elkanii* e de enraizador sobre o desenvolvimento da soja

Bianca Silva Espadoto <sup>1</sup>

Jeferson Vitorino Godinho <sup>1</sup>

Victória Emilio Fernandes <sup>1</sup>

Susi Meire Maximino Leite <sup>2</sup>

## RESUMO

A soja é uma cultura com elevada demanda por nitrogênio (N), em razão do alto teor proteico de seus grãos, o que tem incentivado o uso de inoculantes e enraizadores no plantio. Este estudo avaliou os efeitos da aplicação de *Bradyrhizobium elkanii*, de um enraizador e da combinação de ambos sobre o desenvolvimento da soja. O experimento foi conduzido em campo, em 19,36 hectares, com avaliação de variáveis relacionadas ao crescimento vegetativo, radicular e à produtividade de grãos, considerando 30 plantas por tratamento para cada variável. Os resultados indicaram que o enraizador isolado promoveu maior massa radicular, enquanto *B. elkanii* isolado estimulou o desenvolvimento da parte aérea. Contudo, nenhum tratamento resultou em incremento significativo na produtividade, fato atribuído à heterogeneidade da fertilidade entre as parcelas, à elevada disponibilidade de nitrogênio mineral e às condições climáticas favoráveis ao longo do ciclo. Apesar disso, a inoculação anual com *B. elkanii* permanece recomendada pelo seu custo-benefício e papel na fixação biológica de nitrogênio. Estudos futuros devem avaliar essa associação em condições de menor disponibilidade de nitrogênio, sob estresse hídrico e com parcelas quimicamente homogêneas, a fim de verificar o potencial sinérgico em ambientes limitantes.

**Palavras-chave:** 1. Fixação biológica de nitrogênio 2. Crescimento radicular da soja  
3. Bioestimulantes.

---

<sup>1</sup> Discente em Mecanização em Agricultura de Precisão na FATEC Pompeia “Shunji Nishimura”, Pompeia-SP.

<sup>2</sup> Docente do curso Mecanização em Agricultura de Precisão, FATEC Pompeia, Pompeia-SP.

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* Merr.) é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, com expressiva importância econômica, sendo o Brasil o maior produtor mundial deste grão. A safra nacional de 2024/2025 ocupou uma área de 47,61 milhões de hectares, totalizando uma produção de 169,49 milhões de toneladas, com produtividade média de 3.560 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2025). No mesmo período, a produção mundial de soja foi estimada em 421,9 milhões de toneladas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, com Brasil, Estados Unidos e Argentina concentrando mais de 75% da oferta global (EMBRAPA, 2025). A participação brasileira no mercado global vem se consolidando: entre 2021 e 2023, o país respondeu por mais de 37% da produção mundial, com projeções de crescimento contínuo para a próxima década (MAPA; EMBRAPA, 2023).

A soja é uma cultura com elevada demanda por nitrogênio (N), consequência direta do alto teor proteico de seus grãos, que gira em torno de 40%. Estima-se que, para cada tonelada de grãos produzida, a planta necessite de aproximadamente 80 kg de N, sendo que cerca de 60% desse total é exportado junto com os grãos na colheita. Dessa forma, em lavouras com produtividade de 3.000 kg ha<sup>-1</sup>, a demanda nitrogenada pode chegar a 240 kg ha<sup>-1</sup> quantidade que, quando suprida exclusivamente por fertilizantes minerais, representa custo econômico e ambiental elevado. Por essa razão, a fixação biológica de nitrogênio (FBN), realizada por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, constitui a principal estratégia para atender a essa demanda de forma sustentável, dispensando ou reduzindo significativamente o uso de adubos nitrogenados (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014).

Com a alta procura por melhores produtividades, os agricultores estão em busca de inovações que possibilitem uma maior produção na mesma área. O objetivo principal do setor agrícola baseia-se em descobrir metodologias que auxiliem a planta a enfrentar adversidades, tais como mudanças climáticas, manejo inadequado ou alto custo, assegurando uma colheita rentável para os produtores (ZHAI et al., 2020).

Entre os cuidados essenciais para a lavoura, o uso de bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, destaca-se como um dos mais importantes. Essas bactérias têm a capacidade de capturar o nitrogênio presente no ar e disponibilizá-lo para a planta

(HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001). Esse processo natural supre a necessidade de nitrogênio da cultura, reduzindo ou até eliminando os gastos com adubos químicos.

No entanto, para que essa simbiose seja eficiente, é fundamental que a planta apresente um sistema radicular bem desenvolvido. Nesse contexto, a aplicação de produtos enraizadores torna-se estratégica: eles estimulam o crescimento das raízes, ampliando o espaço para a colonização das bactérias e a formação dos nódulos, resultando em melhora na nutrição e na saúde da planta (MACHADO et al., 2023; HUNGRIA; CAMPO; MENDES, 2001).

Um sistema radicular bem desenvolvido constitui um dos principais mecanismos de resiliência das plantas frente às variações climáticas. Raízes mais profundas permitem maior exploração do perfil do solo, possibilitando o acesso a água e nutrientes em camadas onde outras plantas não alcançam, fator determinante para o enchimento adequado dos grãos na fase reprodutiva. Em condições de precipitação regular e manejo conservacionista, como o plantio direto, a utilização de enraizadores podem potencializar o acúmulo de biomassa tanto no sistema radicular quanto na parte aérea, refletindo em maior produtividade e qualidade das sementes (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

Por outro lado, a irregularidade hídrica representa um risco constante. Em cenários de déficit hídrico severo, o tratamento no sulco de plantio assume papel ainda mais relevante. Enquanto o *Bradyrhizobium elkanii* contribuiria para o suprimento biológico de nitrogênio, os enraizadores assegurariam a expansão radicular necessária para que a planta explore as camadas mais profundas do solo, onde a umidade residual se concentra. Estudos indicam que essa interação reduz significativamente as perdas de rendimento em condições de estresse hídrico (TAIZ et al., 2017).

O desafio atual para o produtor é compreender se o uso combinado de inoculantes e enraizadores realmente traz benefícios que justifiquem o investimento. Ainda há dúvidas no campo sobre a eficácia da inoculação tradicional isolada e se a adição de enraizadores pode ampliar o crescimento das plantas e melhorar os resultados finais. Por isso, é fundamental realizar testes tanto com aplicações individuais quanto com a combinação desses produtos, a fim de gerar informações confiáveis que apoiem a tomada de decisão no momento do plantio. Até o momento,

os dados disponíveis sobre os efeitos da aplicação conjunta de inoculantes e enraizadores ainda são limitados.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar de que forma a aplicação de *Bradyrhizobium elkanii* associada ou não ao uso de enraizadores influencia o desenvolvimento radicular, o crescimento da parte aérea e a produtividade da soja.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em 17 de outubro de 2025, na Fazenda Flores, localizada no município de Salto de Pirapora, São Paulo. A semeadura da soja, utilizando a cultivar 64I61 RSF IPRO, com pureza física de 99% e germinação mínima de 80%, com classificação em peneira de 6,0 mm. Foi realizada sob o Sistema de Semeadura Direta, aproveitando a palhada de sorgo da cultura anterior, que apresentou produtividade média de 75 sacas  $\text{ha}^{-1}$ . A quantidade total de sementes utilizada foi de 809 kg, com uma população de 260.000 sementes por hectare. Para a operação, utilizou-se um conjunto motomecanizado composto por trator New Holland T7.260 e semeadora New Holland PL6014, configurada com 13 linhas de plantio espaçadas em 0,50 m, operando a uma velocidade constante de 5,5 km/h.

A precisão da semeadura foi assegurada por uma regulação de vácuo de 15 in  $\text{H}_2\text{O}$ . Para a aplicação dos tratamentos líquidos via sulco, a semeadora foi equipada com um tanque de 400 litros conectado a uma bomba de diafragma Pentair Shurflo (modelo 5059-1311-D011), calibrada para um volume de calda de 55,78 L  $\text{ha}^{-1}$ . A adubação de base no sulco consistiu na aplicação de 270 kg  $\text{ha}^{-1}$  do formulado Mosaic 04-30-10 (+ 8% Ca + 4,1% S), enquanto a adubação de cobertura foi realizada um dia após o plantio, com a aplicação a lanço de 85 kg  $\text{ha}^{-1}$  de cloreto de potássio (Mosaic 00-00-58).

As condições meteorológicas durante o período experimental foram monitoradas junto à estação automática do INMET mais próxima à área de estudo. A precipitação acumulada entre outubro de 2025 e 7 de março de 2026 foi de 983,8 mm, com pico em dezembro (213,8 mm) e março (254,4 mm). As temperaturas máximas variaram de 28,1 °C a 31,4 °C e as mínimas de 17,0 °C a 20,2 °C (INMET, 2026). Essas condições caracterizam um ciclo sem restrição hídrica ou estresse térmico aparente.

A área total utilizada no experimento foi de 19,36 hectares, subdividida em quatro parcelas experimentais, correspondendo a 4,84 hectares para cada tratamento. A disposição dos tratamentos na área pode ser observada na Figura 1. Foi realizada uma análise química e física do solo em laboratório certificado da Fundação Shunji Nishimura de Pompeia para verificar possíveis variações significativas entre as parcelas.

**Figura 1** - Disposição dos tratamentos na área do experimento conduzido na Fazenda Flores, no município Salto do Pirapora-SP.



Nota: T1: Testemunha (Branca); T2: Aplicação de *Bradyrhizobium elkanii* (Azul); T3: Aplicação de Enraizador (Amarela); T4: Aplicação de *B. elkanii* + Enraizador (Verde). Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O primeiro tratamento consistiu na Testemunha (T1), utilizando-se exclusivamente sementes de soja. O tratamento (T2) consistiu da aplicação exclusiva de *Bradyrhizobium elkanii*, que ao tanque inoculante, foi aplicado o produto comercial Biomax® Premium Soja, da marca Vittia, com concentração de  $7 \times 10^9$  UFC/mL<sup>-1</sup> do produto, a dose utilizada foi de  $0,6 \text{ L ha}^{-1}$  (equivalente a 10 doses comerciais de 60 mL). O produto apresenta em sua composição agentes estabilizantes e bactérias fixadoras de nitrogênio *B. elkanii* das estirpes SEMIA 587 e SEMIA 5019 (CHUEIRE et al., 2003). A aplicação foi realizada e repetida com volume de  $55,78 \text{ L ha}^{-1}$  nos tratamentos (T2, T3 e T4), sendo aplicados 2,9 L de inoculante por tanque.

Aplicação exclusiva de enraizador compôs o terceiro tratamento (T3), utilizando-se o produto comercial UP Seeds (ICL) composto por extrato de algas marinhas e os micronutrientes, como: Potássio (30,82 g L<sup>-1</sup>), Cobalto (6 g L<sup>-1</sup>), Molibdênio (120,6 g L<sup>-1</sup>) e Níquel (12,0 g L<sup>-1</sup>), na dosagem de 0,130 L ha<sup>-1</sup>.

O último tratamento (T4), consistiu da aplicação combinada de *Bradyrhizobium elkanii* e enraizador, mantendo as concentrações e o volume de calda estabelecidos individualmente.

Ressalta-se que, em razão das características operacionais do experimento conduzido em escala comercial, cada tratamento foi alocado em uma única parcela de 4,84 hectares, sem repetição espacial independente. Essa configuração constitui uma limitação do delineamento adotado, uma vez que não permite dissociar completamente o efeito dos tratamentos da variabilidade natural do solo entre as parcelas. Para caracterizar essa variabilidade e afirmar a interpretação dos resultados, foi realizada análise química do solo em cada parcela experimental (FUNDAÇÃO SHUNJI NISHIMURA DE TECNOLOGIA, 2026), cujos resultados são discutidos na seção 3.3. As inferências estatísticas foram conduzidas com base na variabilidade entre plantas dentro de cada parcela, considerando as 30 unidades amostrais por tratamento como repetições observacionais.

Após a inoculação, 30 plantas de cada tratamento foram avaliadas periodicamente a cada 20 dias quanto à altura das plantas e o diâmetro do colo. Aos 61 dias após plantio, quando atingiram estágio fenológico entre V4 e R1, deu-se a extração das plantas para determinação de massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR). O material coletado foi submetido à secagem em ambiente fechado, isento de luz e sob ventilação atmosférica natural até atingir massa constante, método validado para condições de campo sem acesso a estufa laboratorial, conforme adaptação metodológica dos autores, sendo a biomassa determinada por pesagem em balança de precisão de 0,01 g.

Para avaliação de produção, realizou-se a colheita e a análise subsequente dos grãos, igualmente em 30 plantas, aos 144 dias após o plantio. Desta forma, considerando-se que as plantas utilizadas para obtenção de dados de massa seca não foram utilizadas para avaliação de produção de sementes, foram avaliadas 120 plantas.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Levene, para verificar a homogeneidade das variâncias, e ao teste de Shapiro-Wilk, para avaliar a normalidade da distribuição. Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%. Todas as análises foram conduzidas com o auxílio do software estatístico Jamovi (versão 2.6.44).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por se tratar de avaliação conduzida em larga escala operacional, os tratamentos foram implantados em faixas extensas (4,8 ha), condição que naturalmente propiciou a heterogeneidade espacial dos atributos químicos do solo (Tabela 1). Diferenças nos teores de potássio, pH e saturação por bases entre áreas experimentais foram observados principalmente na parcela da Testemunha, o que pode ter influenciado parcialmente as respostas biométricas e produtivas observadas. Embora a amostragem ampliada de plantas (30 plantas por tratamento) tenha buscado reduzir o efeito desta variabilidade, os resultados devem ser interpretados considerando as limitações inerentes ao delineamento em faixas.

**Tabela 1** – Resultado da análise química e granulométrica do solo nas parcelas experimentais. Fazenda Flores, Salto de Pirapora-SP, 2026.

| Tratamentos                         | pH                |                  | MO | P  | K   | mmolc/dm <sup>3</sup> |    |    |      |    | V% | Granulometria (g/kg) |        |       |       |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|----|----|-----|-----------------------|----|----|------|----|----|----------------------|--------|-------|-------|
|                                     | CaCl <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> O |    |    |     | Ca                    | Mg | Al | H+Al | SB |    | T                    | Argila | Silte | Areia |
| T1 – Testemunha                     | 5,8               | 6,4              | 35 | 10 | 4,0 | 35                    | 10 | 0  | 16   | 49 | 65 | 75                   | 541    | 218   | 241   |
| T2 – <i>B. elkanii</i>              | 5,2               | 5,9              | 24 | 13 | 1,3 | 21                    | 9  | 0  | 28   | 31 | 59 | 52                   | 571    | 222   | 207   |
| T3 – Enraizador                     | 5,3               | 6,0              | 24 | 13 | 1,8 | 22                    | 7  | 0  | 28   | 31 | 59 | 53                   | 560    | 229   | 211   |
| T4 – <i>B. elkanii</i> + Enraizador | 5,3               | 6,0              | 23 | 3  | 1,7 | 27                    | 9  | 0  | 28   | 38 | 66 | 57                   | 569    | 237   | 194   |

Nota: MO = matéria orgânica (g/dm<sup>3</sup>); P = fósforo resina (mg/dm<sup>3</sup>); K = potássio (mmolc/dm<sup>3</sup>); Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; T = capacidade de troca catiônica; V% = saturação por bases. Fonte: Laboratório de Análises Agronômicas – Fundação Shunji Nishimura de Tecnologia (2026).

As respostas biométricas observadas serão discutidas a seguir, onde a possível influência das diferenças entre parcelas serão consideradas.

### 3.1 DESENVOLVIMENTO RADICULAR

Entender o ciclo da planta pode ajudar a fazer o manejo na hora certa. Logo nas primeiras semanas, a partir do momento em que a planta abre suas primeiras folhas (fase conhecida como V2), intensifica-se a formação de raízes laterais e o estabelecimento dos nódulos radiculares (FEHR; CAVINESS, 1977). A aplicação de inoculante e enraizador diretamente no sulco de plantio visa aproveitar essa janela crítica de desenvolvimento, posicionando os produtos na região de germinação da semente e favorecendo a colonização bacteriana e o estímulo radicular desde os estágios iniciais do ciclo.

A Figura 2 apresenta exemplares do sistema radicular das plantas de soja nos estádios V4-R1, permitindo a comparação visual entre os quatro tratamentos avaliados.

**Figura 2.** Desenvolvimento do sistema radicular das plantas de soja aos 61 dias após o plantio.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A avaliação da massa seca das raízes, realizada aos 61 dias após o plantio (Tabela 2), evidenciou que os tratamentos exerceram influência significativa sobre o crescimento do sistema radicular ( $F = 4,81$ ;  $p = 0,0035$ ). O tratamento com enraizador

isolado (T3) apresentou o melhor desempenho médio, em relação ao tratamento T2, que utilizou apenas *Bradyrhizobium elkanii*. Os tratamentos T1 (Testemunha) e T4 (*B. elkanii* + Enraizador) apresentaram valores intermediários, sem diferenças estatísticas entre si ou em relação aos demais grupos.

O maior desenvolvimento radicular observado no T3 poderia ser atribuído aos componentes do produto UP Seeds. A presença de micronutrientes como o cobalto e o molibdênio é vital para o funcionamento da nitrogenase, enzima que sustenta a fixação biológica de nitrogênio. Além disso, os reguladores de crescimento presentes em extratos de algas marinhas têm demonstrado estímulo ao crescimento radicular em soja, com melhoras documentadas na anatomia e no comprimento das raízes (HOANG; STEPHENSON, 2024), o que pode ampliar a superfície de absorção das plantas. A ausência do efeito quando foi realizada a mistura de enraizador e *Bradyrhizobium elkanii* pode ter ocorrido pela falta de ajuste de dose, como sugerido por Anandhanambi et al. (2016), que observou, embora em cultura diferente (guava), que concentrações moderadas a altas de IBA combinadas com *Azospirillum* foram eficazes, com respostas variando conforme a dose, princípio hormonal análogo ao observado em soja.

O fósforo desempenha papel central no desenvolvimento radicular da soja, atuando como componente essencial de moléculas energéticas como o ATP, fundamentais para divisão celular e expansão das raízes. A adequada disponibilidade desse nutriente favorece a formação de raízes laterais e aumenta a eficiência da absorção de água e nutrientes, criando condições ideais para a nodulação e a fixação biológica de nitrogênio (FBN) promovida pelo *Bradyrhizobium* (VANCE et al., 2003).

Mesmo quando a cultura é inoculada com *Bradyrhizobium* e estimulada com bioestimulantes à base de algas marinhas — ricos em auxinas e citocininas que promovem o crescimento radicular — a ausência de fósforo limita a expressão máxima desses efeitos, uma vez que o metabolismo energético da planta depende diretamente desse elemento (SHEN et al., 2011).

**Tabela 2** – Massa seca de raiz (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e peso de sementes de plantas de soja submetidas a diferentes tratamentos com *Bradyrhizobium elkanii* e Enraizador, Pompeia, SP, 2026.

| Tratamento                                      | MSR (g)<br>Média ± DP | MSPA (g)<br>Média ± DP | Sementes (g)<br>Média ± DP |
|---|-----------------------|------------------------|----------------------------|
| T1 – Testemunha                                 | 5,80 ± 1,32 ab        | 22,50 ± 4,60 b         | 29,57 ± 7,63 a             |
| T2 – <i>Bradyrhizobium elkanii</i>              | 5,23 ± 1,17 b         | 26,77 ± 6,49 a         | 27,07 ± 4,95 a             |
| T3 – Enraizador                                 | 6,50 ± 1,46 a         | 21,53 ± 6,80 b         | 31,37 ± 7,85 a             |
| T4 – <i>Bradyrhizobium elkanii</i> + Enraizador | 5,70 ± 1,26 ab        | 23,57 ± 6,89 ab        | 29,07 ± 7,02 a             |
| Valor de F                                      | 4,81                  | 3,95                   | 1,94                       |
| <i>p</i> = valor                                | 0,0034*               | 0,0100*                | 0,1275 ns                  |
| CV (%)  | 22,8                  | 27,8                   | 26,8                       |

Nota: Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. DP: desvio padrão. CV: coeficiente de variação. \* significativo (*p* = 0,05); ns: não significativo. Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A limitação de potássio (K) nas áreas que sediaram os tratamentos T1 e T2 e T3, pode ter comprometido a resposta de enraizamento. O potássio exerce papel fundamental na translocação de fotoassimilados e na ativação enzimática, sendo indispensável para o funcionamento adequado dos nódulos formados pelo *Bradyrhizobium* e para o crescimento radicular induzido por enraizadores. Em solos com níveis baixos de K, como 1,3 mmolc/dm<sup>3</sup>, há limitação no transporte de açúcares das folhas para as raízes, o que compromete tanto a nodulação quanto a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN) (RÖMHELD; KIRKBY, 2010). Da mesma forma, embora extratos de algas marinhas forneçam auxinas e citocininas que estimulam a divisão celular e a formação de raízes, a baixa disponibilidade de potássio restringe a funcionalidade dessas raízes, reduzindo sua capacidade de absorção de água e nutrientes (CRAIGIE, 2011). Quando inoculação e enraizadores são

combinados, espera-se uma forte sinergia entre raízes vigorosas e nodulação eficiente; contudo, em condições de deficiência de K, essa interação é apenas parcialmente expressa, resultando em ganhos aquém do potencial observado em solos com níveis adequados de potássio ( $\geq 2,5 \text{ mmolc/dm}^3$ ) (WANG et al., 2013). Assim, o potássio pode ter atuado como fator limitante reduzindo a eficiência tanto da inoculação quanto dos bioestimulantes, sendo crucial para que a soja alcance o máximo benefício dessas práticas de manejo.

Outro fator que pode ter contribuído para a dificuldade em detectar diferenças estatísticas entre as médias dos tratamentos é o elevado coeficiente de variação (CV%) observado (Tabela 1). Embora em experimentos a campo valores de CV superiores a 20% e 30% sejam considerados comuns, de acordo com Pimentel-Gomes (1985), estes estariam classificados como altos, o que poderia comprometer a precisão experimental e reduzir a capacidade de discriminação entre os tratamentos.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DA PARTE AÉREA

Em relação à massa seca da parte aérea, conforme apresentado na Tabela 2, a ANOVA revelou diferenças significativas entre os tratamentos ( $F = 3,95$ ;  $p = 0,0100$ ). Embora o teste de Shapiro-Wilk ( $p = 0,005$ ) tenha indicado violação da normalidade dos resíduos, a análise manteve sua robustez devido ao delineamento balanceado, com 30 repetições por tratamento. Nesse parâmetro, destacou-se a aplicação isolada de *Bradyrhizobium elkanii* (T2), que obteve a maior média ( $26,77 \pm 6,49 \text{ g}$ ), superando estatisticamente a Testemunha (T1), com  $22,50 \pm 4,60 \text{ g}$  ( $p = 0,0462$ ), e o Enraizador isolado (T3), com  $21,53 \pm 6,80 \text{ g}$  ( $p = 0,0085$ ). O tratamento combinado (T4) apresentou média de  $23,57 \pm 6,89 \text{ g}$ , posicionando-se de forma intermediária, não diferindo estatisticamente dos outros tratamentos.

O fator que pode ter contribuído para esse resultado refere-se à possível incompatibilidade entre os componentes do enraizador e o inoculante, visto que produtos aplicados conjuntamente às sementes podem ser tóxicos às células de *Bradyrhizobium*, não necessariamente em razão de seus ingredientes ativos isolados, mas pela formulação como um todo. Nesse sentido, recomenda-se que a aplicação de cobalto e molibdênio via sementes seja substituída pela aplicação foliar no estágio

V3-V5 como estratégia para preservar a viabilidade das bactérias inoculadas (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014).

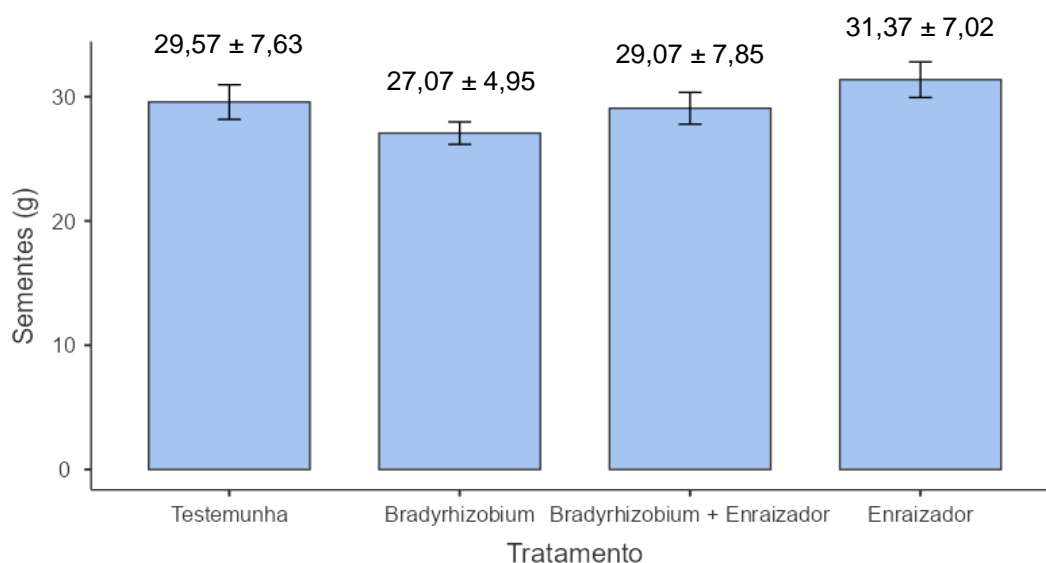
O maior acúmulo de biomassa observado no T2 sugere que a inoculação de *Bradyrhizobium* promoveu uma maior eficiência na fixação biológica de nitrogênio (não avaliada), favorecendo o desenvolvimento vegetativo da soja. Isso ocorre porque o nitrogênio desempenha um papel central na síntese proteica e na manutenção dos teores de clorofila foliar (LACERDA et al., 2020).

Por outro lado, o valor inferior de MSPA no T3 pode refletir uma alteração na partição de fotoassimilados: estudos de meta-análise demonstram que a co-inoculação estimula o sistema radicular de forma proporcionalmente maior do que a parte aérea, com incrementos de até 12,84% na biomassa de raiz (ZEFFA et al., 2020). Este investimento, somado ao elevado custo metabólico da fixação biológica de nitrogênio, onde os nódulos podem drenar até 14% dos fotoassimilados da planta (KASCHUK et al., 2009), pode ter intensificado a competição interna por carbono, priorizando a autonomia nutricional em detrimento do desenvolvimento aéreo imediato (TAMAGNO et al., 2018).

### **3.3 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS**

No que se refere à produção de grãos, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ( $F = 1,94$ ;  $p = 0,1275$ ). Apesar da violação da normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk,  $p < 0,001$ ), a homogeneidade das variâncias foi confirmada (Levene,  $p = 0,597$ ), e o elevado número de repetições ( $n = 30$ ) assegura a confiabilidade dos resultados. As médias obtidas entre os tratamentos encontram-se representadas na Figura 3.

**Figura 3** - Peso médio de sementes (g) de plantas de soja submetidas a diferentes tratamentos.



Nota: Valores expressos em média  $\pm$  desvio padrão (DP). Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A ausência de variação estatística na produtividade final pode ser explicada pela heterogeneidade da fertilidade natural entre as parcelas experimentais, conforme resultados obtidos da análise do solo das parcelas experimentais (Tabela 1). Como pode ser observado, a análise química revelou que a parcela da Testemunha (T1) possuía maior saturação por bases e disponibilidade de potássio que os demais tratamentos (52% a 57%). Além disso, observou-se que o tratamento combinado (T4) foi instalado em área com teor de fósforo de apenas 3 mg/dm<sup>3</sup>, nível considerado muito baixo e limitante para a simbiose, visto que a fixação biológica exige alta disponibilidade energética (VANCE et al., 2003). Essas variações favoreceram a testemunha e restringiram o potencial do tratamento T4, o que pode ter equalizado as produtividades finais e mascarado o efeito dos bioestimulantes.

O uso de adubação mineral com Mosaic 04-30-10 (dose de 270 kg ha<sup>-1</sup>) forneceu níveis de nitrogênio que podem ter minimizado a dependência das plantas em relação à fixação biológica (ZUFFO et al., 2019). Essa hipótese encontra respaldo na literatura especializada: quando o solo apresenta elevada disponibilidade de nitrogênio mineral, a planta tende a reduzir o investimento na simbiose com *Bradyrhizobium*, uma vez que a nodulação é inibida em doses de N acima de 20 kg ha<sup>-1</sup> (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2014). Estudos indicam que essa inibição é uma resposta metabólica da planta para

priorizar a absorção direta do nutriente do solo, mais eficiente energeticamente do que a fixação biológica.

Além disso, condições climáticas favoráveis durante o ciclo da cultura podem ter equalizado o rendimento entre os tratamentos, visto que, em anos com precipitação regular, o potencial produtivo tende a se estabilizar independentemente dos estímulos iniciais aplicados (BATTISTI, 2016).

### **3.4 RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO NESTE EXPERIMENTO**

Nas condições em que o experimento foi conduzido, os resultados indicam que a aplicação do enraizador isolado (T3) foi efetivo no estímulo radicular, superando estatisticamente a aplicação de inoculante (T2). Inversamente, o inoculante isolado (T2) apresentou maior eficiência para o crescimento da parte aérea em comparação a aplicação de enraizador. Contudo, esses ganhos observados na fase vegetativa (parte aérea e raízes) não se traduziram em um aumento real no rendimento reprodutivo sob as condições experimentais avaliadas.

O tratamento combinado (T4), que manteve valores intermediários em todas as variáveis, não demonstrou o efeito sinérgico esperado. Essa falta de interação positiva sugere que os mecanismos de ação dos produtos podem não ter sido otimizados para aplicação conjunta nestas dosagens específicas, ou ainda, que a disponibilidade de nitrogênio no solo reduziu a resposta da planta à inoculação (ZUFFO et al., 2021).

Ainda que os resultados do presente trabalho não tenham evidenciado diferenças estatísticas entre os tratamentos, a análise de custo/benefício justifica a adoção do inoculante como prática consolidada na cultura da soja. No presente experimento, o custo do inoculante à base de *Bradyrhizobium elkanii* foi de R\$ 6,00 por hectare, enquanto o enraizador UP Seeds representou um custo adicional de R\$ 15,00 por hectare, totalizando R\$ 21,00 por hectare no tratamento combinado (T4).

Os três tratamentos não resultaram em resposta produtiva significativa nas condições avaliadas, havendo a possibilidade de que sua eficiência esteja mais relacionada às características climáticas do ambiente de cultivo. Isso reforça a necessidade de estudos adicionais para identificar cenários em que sua adoção seja economicamente viável. Nesse contexto, a aplicação de produtos capazes de aumentar a competitividade das plantas sob estresse ambiental, condições muitas

vezes imprevisíveis, pode representar uma estratégia vantajosa, sobretudo pelo baixo investimento requerido.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produtividade de grãos não apresentou diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, resultado possivelmente influenciado pela heterogeneidade da fertilidade entre as parcelas, pela elevada disponibilidade de nitrogênio mineral e pelas condições climáticas favoráveis ao longo do ciclo. Ainda assim, a inoculação anual com *Bradyrhizobium elkanii* permanece recomendada pelo seu custo-benefício e papel na fixação biológica de nitrogênio. Futuras pesquisas devem avaliar a associação entre inoculante e enraizador em condições de menor disponibilidade de N, sob estresse hídrico e em parcelas quimicamente homogêneas, para verificar o potencial sinérgico em condições limitantes.

#### REFERÊNCIAS

ANANDHANAMBI, E.; ARIVAZHAGAN, R.; KANDASAMY, R. Influence of plant growth regulators and Azospirillum on rooting of air layers in guava (*Psidium guajava* L.). **The Asian Journal of Horticulture**, v. 11, n. 2, p. 261-268, dez. 2016.

Disponível em: <https://doi.org/10.15740/HAS/TAJH/11.2/396-400>. Acesso em: 17 abr. 2026.

BATTISTI, Rafael. **Calibration, uncertainties and use of soybean crop simulation models for evaluating strategies to mitigate the effects of climate change in Southern Brazil**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.11.2016.tde-03102016-162340>. Acesso em: 2 maio 2026.

CRAIGIE, J. S. Estímulos de extratos de algas marinhas em ciência vegetal e agricultura. **Journal of Applied Phycology**, v. 23, p. 371-393, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>. Acesso em: 23 maio 2026.

CHUEIRE, L. M. O. *et al.* Classificação taxonômica das estirpes de rizóbio recomendadas para as culturas da soja e do feijoeiro baseada no sequenciamento do gene 16S rRNA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 833-840, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500007>. Acesso em: 9 maio 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/2025, décimo primeiro levantamento.** Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br>. Acesso em: 25 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Inoculação reduz custos com fertilizantes na soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/46716731>. Acesso em: 25 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Técnicas de inoculação de bactérias aumentam produtividade da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/42282400>. Acesso em: 25 abr. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Soja: dados econômicos.** Londrina: Embrapa Soja, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>. Acesso em: 25 abr. 2026.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. *In*: SEIXAS, C. D. N. *et al.* (Ed.). **Tecnologias de produção de soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2007. p. 1-13. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/470308>. Acesso em: 23 jan. 2026.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development.** Ames: Iowa State University, Cooperative Extension Service, 1977. 11 p. (Special Report, 80). Disponível em: <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/90239>. Acesso em: 23 jan. 2026.

FUNDAÇÃO SHUNJI NISHIMURA DE TECNOLOGIA. **Relatório de análise de solo nº 124623:** Fazenda Flores. Pompeia: Laboratório de Análises Agronômicas, 2026. 1 p. Documento não publicado, disponível com os autores.

HOANG, E.; STEPHENSON, P. *Ascophyllum nodosum* SWE enhances root anatomy, but not POD activity in both a salt-tolerant and salt-sensitive soybean (*Glycine max*) variety exposed to salt stress. **microPublication Biology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17912/micropub.biology.001046>. Acesso em: 10 maio 2026.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro.** Londrina: Embrapa Soja, 2001. 80 p. (Documentos, 168). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/468512>. Acesso em: 15 mar. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP)** — Estação Sorocaba, SP. Brasília: INMET, 2026. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 10 maio 2026.

KASCHUK, G. *et al.* Differences in photosynthetic behaviour and leaf senescence of soybean dependent on N<sub>2</sub> fixation or nitrate supply. **Plant Biology**, v. 12, p. 60-69, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2009.00211.x>. Acesso em: 30 abr. 2026.

LACERDA, E. G. *et al.* Adubação nitrogenada no vigor das mudas, concentração de aminoácidos e proteínas totais e no teor de clorofila no feijão-de-corda (*Vigna unguiculata*). **Agri-Environmental Sciences**, v. 6, p. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36725/agries.v6i0.1413>. Acesso em: 30 abr. 2026.

MACHADO, R. *et al.* Doses de bioestimulante vegetal no desenvolvimento inicial da soja. *In: Editora Científica Digital eBooks*, p. 47-61, 2023. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/230713904>. Acesso em: 22 fev. 2026.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Projeções do Agronegócio: Brasil 2023/2024 a 2032/2033**. Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br>. Acesso em: 25 abr. 2026.

NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Boas práticas de inoculação em soja. *In: REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO SUL*, 40., 2014, Pelotas. **Atas e Resumos...** Londrina: Embrapa Soja, 2014. p. 40-45. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1020357>. Acesso em: 20 abr. 2026.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: FEALQ, 1985. 451 p.

RÖMHELD, V., KIRKBY, EA. Pesquisa sobre potássio na agricultura: necessidades e perspectivas. **Plant Soil** **335**, 155–180 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>. Acesso em: 23 mai. 2026

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997-1005, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>. Acesso em: 18 jun. 2026.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TAMAGNO, S.; SADRAS, V. O.; HAEGELE, J. W. *et al.* Interação entre fertilizante nitrogenado e fixação biológica de nitrogênio em soja: implicações no rendimento de sementes e alocação de biomassa. **Scientific Reports**, v. 8, 17502, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35672-1>. Acesso em: 30 abr. 2026.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, v. 157, n. 3, p. 423-447, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>. Acesso em: 18 jun. 2026.

WANG, M.; ZHENG, Q.; SHEN, Q.; GUO, S. The critical role of potassium in plant stress response. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 14, n. 4, p. 7370-7390, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>. Acesso em: 23 maio 2026.

ZHAI, Zhaoyu; MARTÍNEZ, José Fernán; BELTRAN, Victoria; MARTÍNEZ, Néstor Lucas. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105256, mar. 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>. Acesso em: 16 jun. 2026.

ZEFFA, D. M. *et al.* Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on co-inoculation with Bradyrhizobium in soybean crop: a meta-analysis of studies from 1987 to 2018. **PeerJ**, v. 8, e7905, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.7905>. Acesso em: 30 abr. 2026.

ZUFFO, A. M.; STEINER, F.; BUSCH, A.; SANTOS, D. M. da S. Adubação nitrogenada na soja inibe a nodulação e não melhora o crescimento inicial das plantas. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 12, n. 2, p. 333-349, abr./jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p333-349>. Acesso em: 10 maio 2026.

ZUFFO, A. M.; RATKE, R. F.; AGUILERA, J. G.; STEINER, F. Inoculação de *Bradyrhizobium* spp. associados à aplicação de nitrogênio melhora a qualidade das sementes de soja. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 45, e018721, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145018721>. Acesso em: 4 fev. 2026.