**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**
***CAMPUS* CERRO LARGO**
**CURSO DE AGRONOMIA**

**ROGÉRIO ANTONIO POCZWARDOWSKI**

# CRESCIMENTO INICIAL DA SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) EM DIFERENTES TEMPERATURAS COM INOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasilense*

**CERRO LARGO**
**2025**

**ROGÉRIO ANTONIO POCZWARDOWSKI**

# CRESCIMENTO INICIAL DA SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) EM DIFERENTES TEMPERATURAS COM INOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasilense*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Orientadora: Prof. Dr. Jordana Caroline Nagel

**CERRO LARGO**

**2025**

**Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Poczwardowski, Rogério Antonio
CRESCIMENTO INICIAL DA SOJA (Glycine max (L.) Merrill) EM DIFERENTES TEMPERATURAS COM INOCULAÇÃO DE Azospirillum brasilense / Rogério Antonio Poczwardowski. -- 2025.
42 f.:il.

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Jordana Caroline Nagel

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo,RS, 2025.

I. Nagel, Jordana Caroline, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**ROGÉRIO ANTONIO POCZWARDOWSKI**

# CRESCIMENTO INICIAL DA SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) EM DIFERENTES TEMPERATURAS COM INOCULAÇÃO DE *Azospirillum brasilense*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 04/12/2025

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
JORDANA CAROLINE NAGEL
Data: 08/12/2025 22:56:01 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Dr.ª Jordana Caroline Nagel – UFFS
Orientadora

gov.br Documento assinado digitalmente
VITOR CAUDURO GIRARDELLO
Data: 09/12/2025 08:53:31 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Vitor Cauduro Girardello – URI
Avaliador

gov.br Documento assinado digitalmente
SIDINEI ZWICK RADONS
Data: 09/12/2025 09:42:46 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons – UFFS
Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais,
Ramão e Sabina que não pouparam
esforços para que eu pudesse concluir
meus estudos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por toda a dedicação, que nunca mediram esforços para ajudar, sempre me dando o suporte necessário para meus estudos. Aos meus amigos que me ajudaram durante o período de desenvolvimento deste trabalho, também deixo um agradecimento aos técnicos dos laboratórios que sempre estavam prontamente disponíveis quando necessário para fornecimento de matérias. Por último, mas não menos importante, quero agradecer a professora Jordana que aceitou a responsabilidade de ser a professora orientadora deste trabalho de conclusão de curso, que sempre esteve prontamente disponível para me auxiliar e esclarecer minhas dúvidas quando necessário.

## RESUMO

A ação de microrganismos promotores de crescimento, como *Azospirillum brasilense*, está condicionada à temperatura do ambiente, fator que influencia diretamente sua viabilidade e desempenho como inoculante. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da inoculação com *A. brasilense* sob diferentes regimes térmicos no desenvolvimento inicial da soja. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis temperaturas constantes (18, 22, 26, 30, 34 e 38 °C), com inoculação. A ausência de inoculação foi incluída apenas como tratamento controle a 26 °C. Foram analisadas as variáveis, comprimento da raiz principal, comprimento da parte aérea, número de raízes laterais, massa fresca e porcentagem de emergência. As temperaturas de 26 e 30 °C proporcionaram os melhores resultados, com médias de 7,8 cm para raiz principal, 6,2 cm para parte aérea e 1,15 g de massa fresca. A inoculação promoveu incrementos significativos nessas variáveis, enquanto os tratamentos a 34 e 38 °C apresentaram reduções superiores a 40%. O controle sem inoculação, a 26 °C, obteve valores inferiores em todas as variáveis. As melhores respostas foram obtidas com a inoculação entre 26 e 30 °C, indicando maior eficiência da bactéria sob temperaturas moderadas. Condições térmicas extremas prejudicaram o desenvolvimento das plântulas e reduziram a eficácia do inoculante.



Palavras- chave: inoculação de sementes, rizobactérias promotoras de crescimento, bioinsumos agrícolas.

## ABSTRACT

The action of growth-promoting microorganisms, such as Azospirillum brasilense, is conditioned by the ambient temperature, a factor that directly influences their viability and performance as inoculants. This study aimed to evaluate the effects of inoculation with A. brasilense under different thermal regimes on the initial development of the crop. The experiment was conducted in a completely randomized design, with six constant temperatures (18, 22, 26, 30, 34, and 38 °C), all with inoculation. The absence of inoculation was included only as a control treatment at 26 °C. The variables analyzed were main root length, shoot length, number of lateral roots, fresh weight, and emergence percentage. Temperatures of 26 and 30 °C provided the best results, with averages of 7.8 cm for the main root, 6.2 cm for the aerial part, and 1.15 g of fresh mass. Inoculation promoted significant increases in these variables, while treatments at 34 and 38 °C showed reductions of more than 40%. The control without inoculation, at 26 °C, obtained lower values in all variables. The best responses were obtained with inoculation between 26 and 30°C, indicating greater efficiency of the bacteria under moderate temperatures. Extreme thermal conditions impaired seedling development and reduced the effectiveness of the inoculant.



Keywords: seed inoculation, growth-promoting rhizobacteria, agricultural bio-inputs, *Glycine max* (L.) Merrill.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Médias do comprimento da raiz principal de plântulas de soja submetidas a diferentes temperaturas, com inoculação de Azospirillum brasilense. Cerro Largo - RS, 2025. .....29
Figura 2. Médias do número de raízes laterais em plântulas de soja submetidas a diferentes temperaturas, com inoculação de Azospirillum brasilense. .....30
Figura 3 - Médias da altura da parte aérea de plântulas de soja submetidas a diferentes temperaturas, com inoculação de Azospirillum brasilense. .....31
Figura 4 - médias da massa verde da raiz e massa verde da parte aérea submedida a diferentes temperaturas com inoculação de Azospirillum brasilense, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo - RS, 2025. .....33
Figura 5. Médias da massa seca da raiz e da massa seca da parte aérea de plântulas de soja, em resposta a diferentes temperaturas, sob inoculação com Azospirillum brasilense. .....34
Figura 6. médias do efeito Azospirillum brasilense na temperatura de 26°C, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo - RS, 2025. .....36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – P-valor da ANOVA do comprimento da raiz, N° de raízes laterais, comprimento da parte aérea, massa verde da raiz, massa verde parte aérea, massa seca da raiz e massa seca da parte aérea da soja em diferentes temperaturas com inoculação de *Azospirillum brasilense*.....28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---|---|
| UFFS | Universidade Federal da Fronteira Sul |
| FBN | Fixação Biológica de Nitrogênio |
| AIA | Ácido indolacético |
| PGPR | Rizobactérias promotoras de crescimento vegetal |
| PMET | Ponto de máxima eficiência técnica |

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO ..... 12**
**2. OBJETIVOS ..... 14**
**2.1 OBJETIVO GERAL** ..... 14
**2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS** ..... 14
**3 REVISÃO DE LITERATURA ..... 15**
3.1 SOJA ..... 15
3.2 GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA: FATORES DETERMINANTES ..... 17
**3.2.1 Uso de inoculantes na cultura da soja ..... 18**
**3.2.2 *Azospirillum brasilense* como promotor de crescimento vegetal ..... 19**
**3.2.3 Fatores que afetam a eficiência do *Azospirillum brasilense* ..... 20**
3.3 MÉTODOS DE INOCULAÇÃO NA PRÁTICA AGRÍCOLA ..... 21
**3.3.1. Inoculação nas sementes ..... 21**
**3.3.2. Inoculação no sulco de semeadura ..... 22**
**3.3.3. Pulverização sobre a palhada (inoculação em cobertura) ..... 22**
**4 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 24**
4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO ..... 24
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL ..... 24
4.3 INSTALAÇÃO NAS CÂMARAS DE CRESCIMENTO (BODS) ..... 24
4.4 SEMENTES, PRÉ-GERMINAÇÃO E INOCULAÇÃO ..... 25
4.5 SUBSTRATO E PREPARO ..... 25
4.6 CONDIÇÕES HÍDRICAS, MANEJO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO ..... 26
4.7 AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS ..... 26
4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA ..... 26
**5 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 28**
**6 CONSIDERAÇÕES FINAIS ..... 37**
**REFERÊNCIAS ..... 38**

# 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das culturas agrícolas mais cultivadas no Brasil e em diversos países, tanto pela ampla utilização de seus grãos na alimentação animal e humana quanto pelo fornecimento de insumos para indústrias de óleo vegetal e biocombustíveis. Na safra de 2025, a produção nacional foi estimada em 171,4 milhões de toneladas, distribuídas em cerca de 47,3 milhões de hectares (CONAB, 2025).

A temperatura é uma variável ambiental com efeito direto sobre as fases iniciais do desenvolvimento da soja, interferindo na germinação, na emergência e no crescimento das plântulas. A intensificação de extremos térmicos, impulsionada pelas mudanças climáticas, têm dificultado o estabelecimento uniforme das lavouras, sobretudo durante os estádios iniciais. Estudos demonstram que a exposição a temperaturas elevadas pode comprometer a fisiologia das sementes. Chebrolu *et al.* (2016) relataram, por exemplo, inibição total da germinação em genótipos de soja submetidos a um regime de 42/26 °C (dia/noite).

Alterações na temperatura do ambiente influenciam diretamente o metabolismo das sementes, afetando funções celulares críticas, como a integridade das membranas, a atividade enzimática e os mecanismos antioxidantes. Essas alterações comprometem o processo germinativo e reduzem o vigor das plântulas. De acordo com Krzyzanowski (2018), a faixa térmica considerada adequada para a emergência da soja situa-se entre 20 °C e 30 °C, sendo que temperaturas superiores a 30–35 °C estão associadas à diminuição da taxa de germinação e à limitação do crescimento inicial da cultura.

Considerando esse cenário, estratégias de manejo capazes de amenizar os efeitos negativos do estresse térmico têm sido alvo de estudos agronômicos. Uma das alternativas envolve o uso de rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), microrganismos que atuam na rizosfera e favorecem o desenvolvimento das plantas por meio da produção de fitormônios, da solubilização de nutrientes e da modulação de mecanismos fisiológicos relacionados ao estresse (Hungria, 2011).

*Azospirillum brasilense* é uma bactéria rizosférica comumente empregada na agricultura devido à sua atuação promotora do crescimento vegetal. Atua de forma associativa, sem formação de nódulos, e destaca-se pela capacidade de sintetizar ácido indolacético (AIA), favorecer o desenvolvimento do sistema radicular e atenuar

efeitos de estresses abióticos. Evidências apontam ainda sua capacidade de ativar rotas metabólicas associadas à tolerância a variações térmicas (Souza, Smiderle 2024; Glick, 2012).

Embora o *Azospirillum brasilense* seja amplamente empregado como inoculação, ainda são limitadas as evidências sobre sua eficiência em condições de temperatura elevada. A maior parte dos estudos concentra-se em faixas térmicas favoráveis ao cultivo, havendo escassez de experimentos conduzidos sob estresse térmico. Resultados obtidos por (Cunha *et al*., 2024) indicaram que as estirpes Ab-V5 e Ab-V6 apresentaram redução expressiva na viabilidade celular quando submetidas a temperaturas superiores a 35 °C. Rodrigues (2022) também observou diminuição na resposta agronômica da inoculação com *A. brasilense* em milho sob temperaturas elevadas, sugerindo comprometimento funcional da bactéria. Além disso, ainda são poucos os estudos que investigam a relação entre a atividade microbiana e variáveis morfofisiológicas no desenvolvimento inicial das plantas.

Com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o comportamento de *A. brasilense* sob condições de estresse térmico, torna-se necessária a realização de estudos que abordem especificamente a cultura da soja. Embora existam evidências de que temperaturas acima de 35 °C comprometem o crescimento dessas bactérias, ainda são escassas as investigações que avaliem, de forma integrada, a viabilidade do microrganismo após o estresse, sua capacidade de colonização radicular e a resposta fisiológica inicial da planta em ambientes com temperaturas elevadas.

As variações térmicas a que os insumos agrícolas estão sujeitos, desde o armazenamento até a aplicação no campo, podem comprometer a viabilidade de microrganismos utilizados como inoculantes. Considerando os cenários de elevação térmica frequentes nas etapas iniciais do cultivo, este trabalho propõe avaliar o desempenho da soja submetida à inoculação com *A. brasilense* sob diferentes regimes de temperatura, com ênfase na resposta morfofisiológica das plântulas e na eficiência do inoculante frente ao estresse térmico.

# 2. OBJETIVOS

## 2.1 Objetivo geral

Avaliar o crescimento inicial da soja (Glycine max (L.) Merrill) submetida a diferentes regimes térmicos com inoculação de *Azospirillum brasilense*

## 2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comprimento da raiz principal, o comprimento da parte aérea e o número de raízes laterais em plântulas de soja submetidas a diferentes regimes térmicos, com e sem inoculação com *Azospirillum brasilense*.
- Determinar a massa fresca e a massa seca das plântulas sob distintas temperaturas, comparando os tratamentos inoculados com o controle sem inoculação.
- Verificar a existência de interação entre a inoculação com *A. brasilense* e a temperatura na modulação do desenvolvimento inicial da soja.

# 3 REVISÃO DE LITERATURA

## 3.1 SOJA

Na safra atual a produção mundial foi de 395,91 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2024), e no Brasil foi de 171,47 milhões de toneladas com uma área plantada de 47,35 milhões há (CONAB, 2025) estes dados refletem a relevância estratégica da cultura para o agronegócio nacional para com o desenvolvimento da sociedade, tendo em vista que os volumes de exportação foram de cerca de 150 milhões de toneladas entre os anos de 2019 e 2022 (MAPA, 2024).

Considerada uma das culturas mais importantes para o mundo especialmente pela sua capacidade de produzir uma grande quantidade de proteína de qualidade, que é voltada a alimentação animal na produção de rações e produção de óleo para o consumo humano, além de outros usos não alimentares como lubrificantes industriais e mátria prima para produção de biodiesel (Fernandes; 2024).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de cultivo, acabou se tornando um importante polo de produção de soja, impulsionada pela pesquisa e desenvolvimento de cultivares adaptadas e técnicas de manejo, como o plantio direto, calagem e a adubação, foram alguns dos fatores que impulsionaram a expansão da soja, e foram cruciais no desenvolvimento de cultivares adaptadas a diferentes regiões do Brasil, incluindo o Cerrado, que permitiram aumentar a produtividade nacional, bem como a sustentabilidade da cultura, graças a estudos realizados pela Embrapa e seus parceiros que foram pioneiros na adaptação da soja as condições de solo e clima do Cerrado a Embrapa criou um sistema de produção de soja tropical (Dall' Agnol, 2010).

Isso inclui recuperação/manutenção da fertilidade do solo, técnicas de manejo da cultura, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, além de melhorar a qualidade das sementes, que quando com um alto vigor favorecem a emergência mais rápida e uniforme, maior desenvolvimento radicular inicial e melhor capacidade de recuperação frente a estresses (França Neto, 2018) que são componente da produção influenciado pelos fatores de manejo da área agrícola, buscando sempre altos rendimentos econômicos, esse conjunto de tecnologias tem permitido a sustentabilidade agrícola da cultura (Landgraf; 2025).

A fase de implantação da cultura da soja é um dos componentes mais críticos para o alcance do potencial produtivo, pois define a uniformidade do estande, o vigor inicial das plântulas e a capacidade de estabelecimento da lavoura. A escolha adequada da janela de semeadura é determinante para que a emergência ocorra sob condições favoráveis de temperatura, umidade e luminosidade. Quando a semeadura ocorre dentro do período recomendado, a cultura apresenta maior probabilidade de atingir seu ciclo sob condições climáticas ideais, o que contribui para maior estabilidade de produção (Seixas *et al;* 2020).

A uniformidade de estande também desempenha papel fundamental no desempenho da cultura. Plantas distribuídas de forma homogênea apresentam menor competição intraespecífica e melhor aproveitamento de luz, água e nutrientes, refletindo em maior produtividade por área. Falhas ou desuniformidades na emergência podem resultar em redução de rendimento e maior pressão de plantas daninhas, exigindo maior intervenção química (Krzyzanowski; Henning, 2018).

O vigor inicial das sementes é outro fator essencial para o bom desenvolvimento da cultura. Sementes de alto vigor apresentam emergência mais rápida e homogênea, maior crescimento radicular inicial e maior resiliência frente a estresses abióticos, como variações de temperatura, baixa umidade ou compactação do solo. Esses aspectos são decisivos para a formação de um estande adequado e para o fechamento do dossel em tempo oportuno, reduzindo perdas decorrentes de competição e estresse inicial (França Neto *et al.* 2016)

O entendimento dos processos fisiológicos envolvidos na germinação e no desenvolvimento inicial da soja é essencial para otimizar a implantação da cultura e, consequentemente, a produtividade. A germinação é diretamente influenciada por fatores ambientais, especialmente temperatura e umidade, e pelo vigor das sementes. Condições inadequadas durante essa fase podem comprometer a emergência, reduzir o número de plantas estabelecidas e prejudicar o crescimento (França Neto et al., 2016).

Temperaturas fora da faixa ideal de germinação, de 20 a 30 °C, tendem a retardar a velocidade de emergência ou causar danos às plântulas, afetando negativamente o estabelecimento do estande. Como a produtividade da soja depende da interceptação eficiente de luz durante o ciclo e do desenvolvimento adequado de ramos e vagens, qualquer prejuízo no desenvolvimento inicial tende a reduzir o potencial de rendimento final (Souza; 2024)

## 3.2 GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO INICIAL DA SOJA: FATORES DETERMINANTES

A germinação das sementes é um processo fisiológico fundamental para o estabelecimento da cultura, consistindo em três fases principais: 1° imbebição de água, quando a semente absorve água rapidamente; 2° ativação metabólica, onde ocorre intensificação do metabolismo e reparo de tecidos; e 3° ocorre o alongamento da radícula, etapa em que a radícula rompe o tegumento e inicia o desenvolvimento da plântula (Beckert*; et al*., 2000). O sucesso dessa sequência fisiológica depende diretamente das condições ambientais, sendo a temperatura um dos fatores determinantes para a velocidade e uniformidade da germinação da soja.

A faixa térmica ideal para a germinação da soja situa-se entre 20 e 30°C, favorecendo tanto a ativação metabólica quanto a emergência rápida e uniforme das plântulas. Temperaturas inferiores a 20°C tendem a retardar o processo de germinação, prolongando o tempo em que a semente permanece vulnerável a estresses abióticos e a patógenos de solo, além de, comprometer a emergência. Por outro lado, temperaturas acima de 30 a 35°C podem provocar danos térmicos, reduzindo o vigor das sementes, comprometendo o estabelecimento do estande e resultando em população inicial abaixo da desejada (Sousa; 2021).

A temperatura do solo exerce influência direta sobre a germinação e o estabelecimento inicial das plântulas. Embora seja afetada pela temperatura do ar, o solo apresenta resposta térmica mais lenta, acumulando calor conforme suas características físicas, como textura, umidade e cobertura. Em condições de baixa radiação ou após noites frias, a manutenção de temperaturas reduzidas no solo pode retardar a germinação, mesmo com elevação da temperatura do ar. Por outro lado, em situações de alta radiação e baixa umidade, a elevação excessiva da temperatura do solo pode intensificar o estresse térmico nas sementes, comprometendo a emergência. (Marcos-Filho, 2015)

A interação entre temperatura e umidade do solo influencia diretamente o desempenho germinativo. Solos frios e excessivamente úmidos elevam o risco de incidência de patógenos, enquanto temperaturas elevadas associadas à baixa umidade podem comprometer tanto a viabilidade das sementes quanto o processo de embebição. Além disso, a eficiência da inoculação pode ser afetada, uma vez que variações térmicas desfavoráveis tendem a reduzir a atividade de microrganismos

benéficos na rizosfera, especialmente durante os estágios iniciais de colonização (Farias; Nepomuceno; Neumaier. 2007).

Considerando os fatores analisados, observa-se que a temperatura constitui uma variável determinante para o estabelecimento inicial da cultura da soja, influenciando desde os processos fisiológicos associados à germinação até a resposta da planta à inoculação com microrganismos promotores de crescimento. A adoção de estratégias que envolvam o monitoramento das condições térmicas do solo e do ar, assim como a realização da semeadura em períodos compatíveis com a faixa térmica ideal, contribui para a obtenção de plântulas uniformes e vigorosas. Nesse contexto, a investigação da temperatura como variável central neste estudo mostra-se justificada, tendo em vista sua relevância para a fase inicial de desenvolvimento da cultura.

### 3.2.1 Uso de inoculantes na cultura da soja

Inoculantes são considerados essenciais para a produção de soja no Brasil devido a três fatores principais: dependência elevada da cultura por nitrogênio, altíssima eficiência da Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN) e impacto econômico direto na redução de custos de produção, além de benefícios ambientais significativos (Hungria; Campo; Mendes, 2013).

Inoculantes microbianos têm sido amplamente utilizados na fixação biológica de nitrogênio (FBN) e no estímulo ao desenvolvimento vegetal. No caso da soja, a simbiose com bactérias do gênero *Bradyrhizobium spp.* constitui o principal mecanismo de FBN, por meio da formação de nódulos radiculares onde o nitrogênio atmosférico é convertido em amônio, forma assimilável pela planta. (Seixas *et al.,* 2020).

Além dos rizóbios simbióticos, destacam-se as rizobactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), grupo no qual se insere o *Azospirillum brasilense*, amplamente usado na agricultura brasileira. Embora *Azospirillum* seja capaz de fixar pequenas quantidades de nitrogênio de forma associativa, sua contribuição não substitui a fixação biológica do nitrogênio realizada pelos rizóbios simbióticos como o *Bradyrhizobium japonicum* (Hungria, 2016).

O gênero *Azospirillum* é utilizado como inoculante complementar à FBN na soja, atuando principalmente na promoção do crescimento radicular, ampliação da

absorção de água e nutrientes, aumento do vigor no estabelecimento inicial e mitigação dos efeitos de estresses abióticos, como déficit hídrico e temperaturas elevadas (Hungria *et al*., 2013). No entanto, sua aplicação não substitui o uso de *Bradyrhizobium spp.*, uma vez que *Azospirillum* não forma nódulos e não contribui diretamente para o suprimento da demanda nitrogenada da cultura. A coinoculação desses microrganismos tem sido associada a efeitos sinérgicos sobre o crescimento e o desempenho agronômico, embora atuem por mecanismos distintos no sistema radicular da planta (Libório *et al.,*2020).

### 3.2.2 *Azospirillum brasilense* como promotor de crescimento vegetal

O uso agrícola de *Azospirillum spp*. intensificou-se a partir da década de 1970, inicialmente em gramíneas como milho e trigo. Posteriormente, estudos demonstraram seu potencial para promover o desenvolvimento inicial da soja (Reis, 2014). Trata-se de uma bactéria de vida livre que estabelece associação não simbiótica com as raízes, fixando nitrogênio de forma associativa, sem formação de nódulos, e contribuindo suplementarmente para a nutrição nitrogenada (Hungria, 2011).

O principal mecanismo fisiológico associado ao *Azospirillum brasilense* é a produção de fitormônios, especialmente ácido indolacético (AIA). Esses compostos estimulam o crescimento radicular, ampliam o volume e a arquitetura das raízes e aumentam a absorção de água e nutrientes. Além disso, o microrganismo favorece a tolerância da planta a estresses abióticos, como seca, acidez do solo e variações de temperatura, trazendo benefícios diretos ao estabelecimento e ao vigor inicial da soja (Hungria, 2011).

Diversos estudos apontam ganhos consistentes de desenvolvimento e produtividade decorrentes da inoculação com *Azospirillum spp*., inclusive quando utilizado em complementação ao *Bradyrhizobium spp.,* prática conhecida como coinoculação (Prando *et al*., 2022). No entanto, no presente estudo, o enfoque recai exclusivamente sobre os efeitos do *Azospirillum brasilense* no desenvolvimento inicial da soja.

### 3.2.3 Fatores que afetam a eficiência do *Azospirillum brasilense*

A eficiência do *A. brasilense* depende de uma série de fatores ambientais, operacionais e fisiológicos. Entre os principais, destacam-se: Temperatura onde a faixa considerada adequada para atividade metabólica do *Azospirillum spp.* situa-se entre 22 e 30°C, condição que favorece a colonização radicular e produção de fitormônios (Seixas et al., 2020).

Temperaturas acima de 35°C reduzem a viabilidade das células bacterianas, especialmente quando ocorrem durante a inoculação ou semeadura, prejudicando a fixação associativa. Em contraste, temperaturas muito baixas retardam a colonização e diminuem o desempenho do inoculante (Farias; Nepomuceno; Neumaier. 2007). Assim, a temperatura constitui variável central para a compreensão da resposta da planta à inoculação, justificando sua investigação neste estudo.

O pH do solo regula a sobrevivência, a colonização radicular e o metabolismo da bactéria. Condições levemente ácidas a neutras tendem a favorecer sua performance, enquanto valores extremos podem reduzir significativamente sua eficiência. A mobilidade e o estabelecimento bacteriano dependem da umidade adequada. Solos excessivamente úmidos reduzem a oxigenação e prejudicam a atividade microbiana, ao passo que solos secos limitam o deslocamento da bactéria até a rizosfera. A eficiência da inoculação está condicionada ao uso de produtos com elevada concentração de células viáveis, dentro do prazo de validade e armazenados corretamente (Zilli *et al.,* 2010).

A dose recomendada pelo fabricante deve ser rigorosamente seguida, além de se ter cuidados com alguns fungicidas e inseticidas utilizados que no tratamento de sementes apresentam efeito tóxico sobre o *Azospirillum spp*. Quando o tratamento químico for indispensável, recomenda-se aplicar o inoculante por último ou optar pela aplicação no sulco de plantio (EMBRAPA, 2020).

O tempo entre inoculação e semeadura é extremamente importante, a semeadura deve ocorrer preferencialmente em até 24 horas após a inoculação, evitando perdas de viabilidade decorrentes da dessecação ou exposição ao calor e à radiação solar (EMBRAPA, 2020).

Quanto aos fatores ligados à planta, a resposta pode variar entre cultivares de soja, e a maior eficiência do inoculante ocorre quando aplicado na fase inicial da

cultura, período em que o estímulo ao crescimento radicular é decisivo (Cassán; Diaz-Zorita, 2016).

## 3.3 MÉTODOS DE INOCULAÇÃO NA PRÁTICA AGRÍCOLA

Diversas técnicas podem ser empregadas para assegurar a colonização eficiente das raízes pela microbiota inoculada. Entre os métodos mais utilizados, destacam-se: a inoculação nas sementes, a aplicação no sulco de semeadura e a pulverização sobre a palhada em sistemas de plantio direto. Para cada técnica, é fundamental considerar vantagens, limitações e cuidados operacionais, especialmente aqueles relacionados à temperatura, fator crítico para a sobrevivência e multiplicação dos microrganismos.

### 3.3.1. Inoculação nas sementes

A inoculação direta nas sementes é o método mais empregado pelos produtores, devido à sua praticidade e ao contato imediato das bactérias com as raízes após a germinação. Esse procedimento consiste na mistura do inoculante com as sementes momentos antes da semeadura, seguida de homogeneização cuidadosa e secagem à sombra, evitando-se a exposição ao sol e ao calor excessivo, que podem comprometer a viabilidade microbiana (Munhoz, 2016)

Entre suas vantagens, destaca-se a elevada eficiência de colonização, desde que se tome os cuidados necessários, como dose recomendada pelo fabricante, e a uniformidade de distribuição do inoculante. Entretanto, esse método apresenta limitações, como a sensibilidade dos microrganismos a produtos químicos utilizados no tratamento de sementes, sobretudo fungicidas e inseticidas incompatíveis. Assim, recomenda-se atenção às recomendações do fabricante para evitar a mortalidade das bactérias (EMBRAPA, 2020).

Quanto à temperatura, a inoculação na semente é particularmente sensível a solos quentes no momento da semeadura. Temperaturas superficiais elevadas maiores de 30 a 35°C podem reduzir drasticamente a sobrevivência do inoculante devido à dessecação e aos danos térmicos, sendo recomendada a semeadura em

horários de menor radiação (início da manhã ou final da tarde evitando ultrapassar 24 horas após a inoculação) (Mercante, 2011).

### 3.3.2. Inoculação no sulco de semeadura

A aplicação do inoculante diretamente no sulco de semeadura representa uma alternativa eficiente, especialmente em situações em que se deseja evitar o contato do inoculante com defensivos químicos aplicados nas sementes. Nesse método, o produto é distribuído no solo na linha de semeadura imediatamente antes da deposição das sementes (Munhoz, 2016).

A principal vantagem dessa técnica é a proteção das bactérias contra agentes químicos e condições ambientais adversas, além da maior estabilidade hídrica proporcionada pelo solo, que favorece a sobrevivência microbiana. No entanto, a inoculação no sulco apresenta limitações, como a necessidade de equipamentos específicos para aplicação e a possibilidade de menor uniformidade, caso o sistema não esteja devidamente calibrado (Souza, 2024)

Em relação à temperatura, a inoculação no sulco tende a ser menos afetada pelas condições térmicas extremas, uma vez que o solo atua como isolante. Ainda assim, temperaturas muito elevadas. No que se refere ao volume de calda, recomenda-se utilizar a quantidade suficiente para distribuir uniformemente o inoculante sem gerar excesso de água, pois volume excessivo pode diluir o inoculante e reduzir a fixação associativa (Hungria, 2011)

### 3.3.3. Pulverização sobre a palhada (inoculação em cobertura)

A inoculação via pulverização sobre a palhada, utilizada principalmente em sistemas de plantio direto, consiste na aplicação do inoculante sobre a cobertura vegetal momentos antes da semeadura. Essa técnica busca favorecer a colonização do ambiente radicular antes da emergência das plantas (Dressler, A. L. *et al.,* 2025)

Como vantagem, destaca-se a possibilidade de aplicação mecanizada em grande escala, além da flexibilidade operacional. Contudo, sua eficiência pode ser inferior quando as condições ambientais não são favoráveis, especialmente em situações de baixa umidade do ar e do solo ou de alta radiação solar, fatores que elevam a taxa de dessecação das bactérias e reduzem sua sobrevivência (Wasmuth *et al*., 2024). Os cuidados com a temperatura são críticos nesse método, pois o

inoculante aplicado sobre a superfície está mais exposto à radiação ultravioleta e ao aquecimento da palhada. Assim, recomenda-se realizar a aplicação em períodos de menor insolação, preferencialmente em dias nublados ou em horários de menor intensidade solar pois o mesmo pode perder viabilidade antes mesmo de atingir a semente, especialmente quando exposto a condições adversas. Outro fator crítico é a presença de palhada em sistemas de plantio direto, que tende a aquecer mais que o solo mineral; a combinação de radiação ultravioleta e altas temperaturas na superfície pode levar à morte acelerada das bactérias, diminuindo ainda mais a eficiência da colonização inicial (Schweig; Lourenço; Menegasso, 2017).

# 4 MATERIAIS E MÉTODOS

## 4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Fisiologia Vegetal da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Cerro Largo – RS, em ambiente controlado, utilizando câmaras de crescimento do tipo BOD. As unidades experimentais foram mantidas sob fotoperíodo de 16 horas de luz e 8 horas de escuro, durante 14 dias. Esse período experimental foi definido por corresponder à fase inicial de estabelecimento do sistema radicular da soja, segundo Neumaier, Nepomuceno e Farias (2020) permitindo uma análise mais precisa dos efeitos dos tratamentos sobre o desenvolvimento das plântulas.

## 4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por sete tratamentos, dos quais seis corresponderam a diferentes temperaturas com inoculação (18, 22, 26, 30, 34 e 38 °C) e um tratamento controle, sem inoculação, conduzido exclusivamente a 26 °C. Cada tratamento foi constituído por quatro repetições, representadas por bandejas contendo 20 plântulas cada, totalizando 80 plântulas por tratamento.

## 4.3 INSTALAÇÃO NAS CÂMARAS DE CRESCIMENTO (BODS)

Foram utilizadas quatro câmaras do tipo BOD (marcas Lucadema, Eletrolab e Biofoco). Em cada equipamento foram dispostas quatro bandejas, correspondentes às repetições. Para minimizar interferências internas relacionadas à variação de luminosidade, umidade e circulação de ar, as bandejas foram rotacionadas diariamente no sentido horário, bem como redistribuídas internamente dentro das câmaras.

## 4.4 SEMENTES, PRÉ-GERMINAÇÃO E INOCULAÇÃO

As sementes utilizadas foram fornecidas pela empresa Giovelli Sementes, sendo previamente selecionadas de forma manual, com base na uniformidade de tamanho e ausência de danos físicos. A pré-germinação foi realizada em caixas Gerbox, contendo papel germitest umedecido com água destilada na proporção de 2,5 vezes a massa do papel (Brasil, 2009). Após 48 horas, quando as radículas atingiram aproximadamente 2 mm, procedeu-se à inoculação.

O inoculante empregado foi *Azospirillum brasilense* (produto comercial Octa Azos, com concentração de 1,0 × $10^9$ UFC/ml), aplicado conforme a recomendação do fabricante (2 a 4 ml/kg de semente). A aplicação foi realizada individualmente, utilizando micropipeta de volume ajustável (0,5 a 10 µL), com volume de 0,011 ml por radícula. Todo o procedimento foi conduzido sob condições assépticas, com o uso de materiais previamente esterilizados, a fim de evitar contaminações cruzadas.

## 4.5 SUBSTRATO E PREPARO

Optou-se pelo uso de areia como substrato devido à sua reduzida interferência química e ausência de nutrientes disponíveis, o que evita efeitos confusos nas respostas fisiológicas das plântulas aos tratamentos aplicados. Além disso, a areia apresenta boa capacidade de drenagem e homogeneidade física, atributos que favorecem a uniformidade experimental em condições controladas (Campos, 2017).

O preparo do substrato envolveu peneiração e lavagem em água corrente para eliminação de partículas finas, seguida de esterilização em estufa a 180 °C por 1 hora. O resfriamento foi conduzido com a porta da estufa mantida fechada, a fim de evitar contaminações. Após esse processo, o material foi alocado em bandejas plásticas previamente higienizadas com solução alcoólica a 70% e uniformemente umedecido com 1 L de água destilada por unidade experimental. Na sequência, realizaram-se sulcos superficiais para deposição das sementes pré-germinadas, que foram cobertas por uma pequena camada de areia esterilizada.

## 4.6 CONDIÇÕES HÍDRICAS, MANEJO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

A irrigação foi realizada conforme a necessidade hídrica observada, com média de 600 mL de água destilada por tratamento, mantendo o substrato úmido, sem causar encharcamento ou déficit hídrico. As bandejas permaneceram nas câmaras BOD ao longo de todo o experimento e foram rotacionadas diariamente, de modo a assegurar homogeneidade das condições ambientais internas.

## 4.7 AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS

As avaliações foram realizadas aos 14 dias após a semeadura, momento no qual as plântulas atingiram o estágio de desenvolvimento adequado para mensuração dos efeitos fisiológicos iniciais decorrentes da inoculação e das diferentes temperaturas. A coleta foi conduzida com o auxílio de colher e pincel, a fim de preservar a integridade do sistema radicular.

Após a remoção, as plântulas foram lavadas em água corrente e submetidas à análise das seguintes variáveis morfofisiológicas, comprimento da raiz principal, medido com régua milimetrada do colo até o ápice da raiz pivotante, comprimento da parte aérea, também mensurada do colo até o ápice da plântula, e número de raízes laterais, obtido por contagem direta das ramificações ao longo da raiz principal.

Em seguida, procedeu-se à determinação da massa fresca da parte aérea e da massa fresca do sistema radicular, utilizando balança de precisão. Após essa etapa, o material foi acondicionado em estufa de circulação forçada, a 50 °C por 72 horas, para obtenção da massa seca da parte aérea e da massa seca das raízes, por meio de nova pesagem após a secagem completa.

## 4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando o delineamento inteiramente casualizado. Quando identificado efeito significativo pelo teste F ($p < 0,05$), as médias foram submetidas à análise de regressão a 5% de probabilidade, utilizando o software SISVAR.
A comparação entre o tratamento inoculado com *A. brasilense* e a testemunha sem

inoculação foi realizada separadamente, por meio de teste de médias, considerando que o controle sem inoculação foi avaliado apenas sob a temperatura de 26 °C, não integrando o fator temperatura.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comprimento da raiz principal das plântulas, N° de raízes laterais, comprimento da parte aérea, massa verde da raiz, massa verde parte aérea, massa seca da raiz e massa seca da parte aérea da soja foi influenciado significativamente pelos diferentes regimes térmicos ($p < 0,05$). A Tabela 1 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) para estas variáveis, obtidas aos 14 dias após a semeadura.

Tabela **1** – P-valor da ANOVA do comprimento da raiz, N° de raízes laterais, comprimento da parte aérea, massa verde da raiz, massa verde parte aérea, massa seca da raiz e massa seca da parte aérea da soja em diferentes temperaturas com inoculação de *Azospirillum brasilense*.

| Variáveis | P – valor | CV (%) |
|---|---|---|
| Comprimento da raiz | < 0,0001 | 10,94 |
| N° de raízes laterais | < 0,0001 | 27,31 |
| Comprimento da parte aérea | < 0,0001 | 18,77 |
| Massa verde da raiz | < 0,0001 | 33,59 |
| Massa verde parte aérea | < 0,0004 | 35,17 |
| Massa seca da raiz | < 0,0001 | 47,54 |
| Massa seca da parte aérea | < 0,0122 | 55,86 |

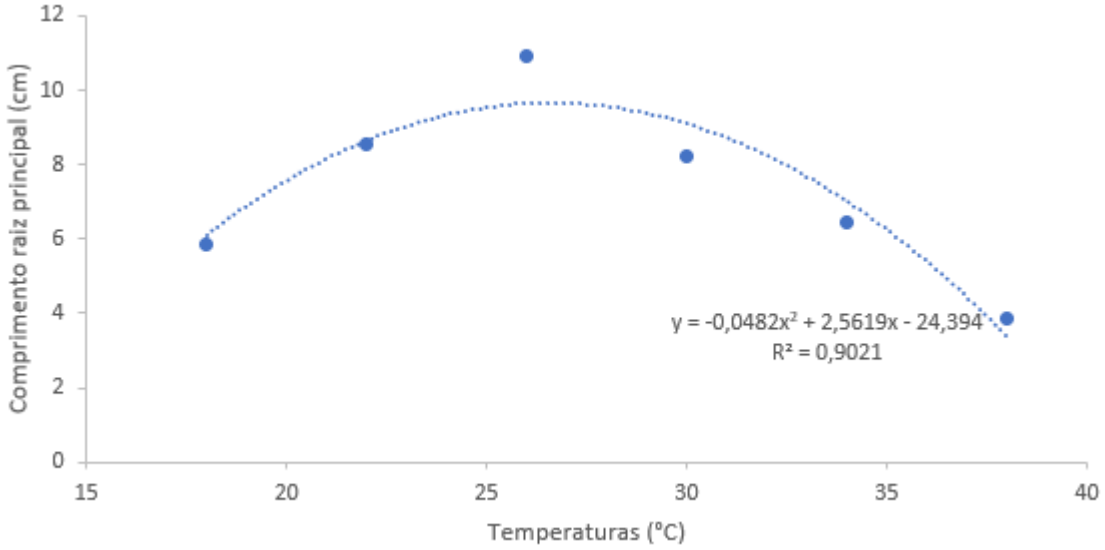
***** Significativo pela ANOVA a 5% de probabilidade de erro**.**

Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A análise demonstrou efeito significativo da temperatura sobre o comprimento da raiz principal, com elevada precisão experimental, conforme indicado pelo baixo coeficiente de variação (CV=10,94) tabela 1.

As médias por temperatura são apresentadas na Figura 1. Os maiores comprimentos radiculares foram observados nas temperaturas moderadas, com pico na faixa entre 26 °C e 30 °C (10,925 e 8,228 cm). Em contrapartida, as temperaturas extremas (18 °C e 38 °C) resultaram em reduções expressivas no desenvolvimento radicular 5,856 e 3,84cm.

Figura 1. Médias do comprimento da raiz principal de plântulas de soja submetidas a diferentes temperaturas, com inoculação de *Azospirillum brasilense*. Cerro Largo - RS, 2025.




Fonte: elaborado pelo autor (2025)

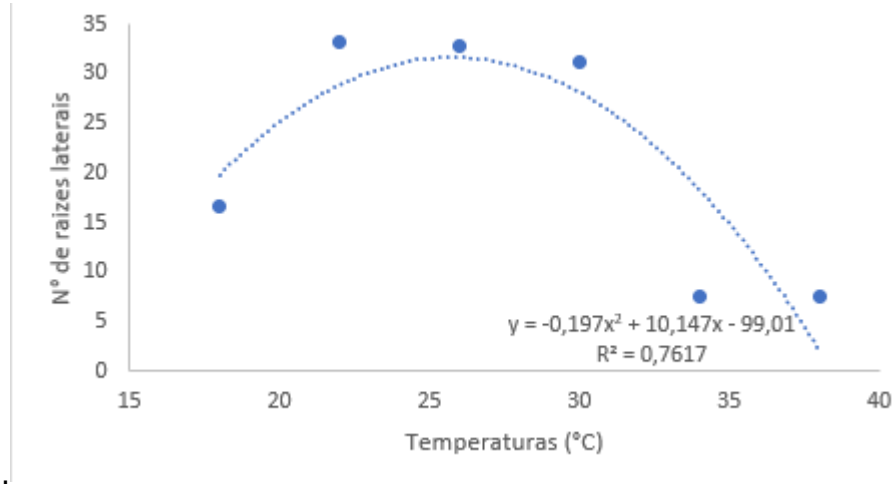
O ajuste quadrático apresentou um ponto de máxima eficiência técnica (PMET) a 26,6 °C, entretanto, esse valor deve ser interpretado dentro da faixa fisiológica ótima de 26 a 30 °C para a soja. Assim, o pico matemático não significa que 26,6 °C seja superior às demais temperaturas moderadas, mas apenas que esse ponto apresentou o maior valor dentro do conjunto de dados. De forma coerente com a literatura, 26 a 30 °C representaram a faixa de melhor desempenho radicular, conforme descrito por (Seixas *et al.* 2020). A partir de 30 °C (8,23 cm), verificou-se redução progressiva no desenvolvimento radicular, com queda acentuada a 34 °C (6,47 cm) e 38 °C (3,84 cm).

A redução no crescimento radicular em temperaturas elevadas pode estar associada ao aumento da taxa respiratória das plântulas, elevando o consumo energético e restringindo os processos de elongação celular. Paralelamente, a exposição a temperaturas superiores a 32/35 °C compromete a viabilidade de *Azospirillum brasilense*, limitando sua atividade fisiológica e reduzindo a síntese de fitormônios como o ácido indolacético (AIA), relacionado à formação e ao alongamento das raízes (Hungria, 2016). Assim, o estresse térmico impacta negativamente tanto os mecanismos internos da planta quanto a funcionalidade do inoculante bacteriano durante os estágios iniciais de desenvolvimento.

O número de raízes laterais apresentou variação significativa em função da temperatura ($p < 0,05$), conforme evidenciado na Tabela 1. O coeficiente de variação (CV) foi de 27,31%, e a média geral obtida foi de 21,49 raízes por plântula. O modelo estatístico aplicado demonstrou que o fator temperatura impactou de forma consistente essa variável, indicando sensibilidade do crescimento radicular às variações térmicas no período avaliado.

A Figura 2 mostra a distribuição das médias do número de raízes laterais em função da temperatura. Observou-se que os maiores valores foram registrados nas faixas entre 22°C e 30 °C (33,225 e 31,225), onde (PMET) ocorreu em 25,7°C, com redução acentuada nas temperaturas extremas. Em 38 °C (7,537), a formação de raízes secundárias foi substancialmente comprometida, evidenciando os efeitos negativos do estresse térmico sobre a morfogênese radicular. Tendo assim interferência no número de raízes laterais que podemos observar na figura 2 onde as maiores emoções de raízes laterais foram em 22 °C (33,22) e 26°C (32,83).

Figura 2. Médias do número de raízes laterais em plântulas de soja submetidas a diferentes temperaturas, com inoculação de Azospirillum brasilense




Fonte: elaborado pelo autor (2025)

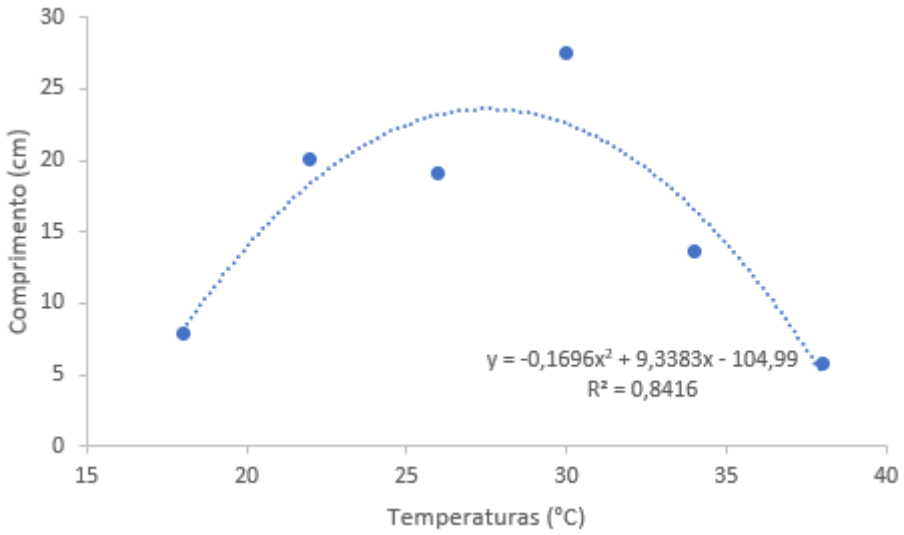
A emissão de raízes laterais atingiu os maiores valores na faixa de 22 °C (33,22), mantendo desempenho semelhante a 26 °C e 30°C (32,83 e 31,23), o que sugere que essas temperaturas favorecem a atividade meristemática e a diferenciação celular no sistema radicular. A partir de 34 °C, houve redução acentuada na formação de raízes, com médias de 7,57 a 34 °C e 7,54 a 38 °C, caracterizando sensibilidade térmica nos processos envolvidos na morfogênese radicular. Resultados

semelhantes foram observados por Fonseca de Lima *et al.* (2021), que verificaram queda na densidade e no crescimento de raízes laterais sob temperaturas elevadas, com prejuízos à estrutura radicular. Além disso, em condições de estresse térmico, há relatos de diminuição na colonização por bactérias benéficas como *Azospirillum brasilense*, o que pode limitar a produção de fitormônios associados à indução de raízes e comprometer a interação benéfica na rizosfera.

A altura da parte aérea das plântulas de soja apresentou variação significativa em função da temperatura ($p < 0,05$), conforme apresentado na Tabela 1. O coeficiente de variação (CV) foi de 18,77%, indicando boa precisão experimental, com média geral de 15,64 cm. A análise de variância evidencia que o regime térmico influenciou de forma expressiva a elongação da parte aérea durante o período avaliado.

Na Figura 3, observa-se que as maiores médias de altura da parte aérea foram registradas a 26 °C e 30 °C, com redução significativa a partir de 34 °C. O aumento térmico além da faixa ideal comprometeu o alongamento celular e, consequentemente, o crescimento da parte aérea, padrão semelhante ao observado para o sistema radicular.

Figura 3 - Médias da altura da parte aérea de plântulas de soja submetidas a diferentes temperaturas, com inoculação de Azospirillum brasilense.




Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A altura da parte aérea das plântulas ajustou-se a um modelo quadrático ($R^2 = 0,8416$), ajustado indicou (PMET) a 27,4°C, indicando que essa faixa térmica promove

condições adequadas para o crescimento vegetativo inicial. De acordo com Streck *et al.* (2005), temperaturas entre 25 °C e 30 °C favorecem o balanço fisiológico entre respiração e fotossíntese, otimizando a produção de biomassa. Em contrapartida, a 18 °C observou-se a menor média (7,88 cm), representando uma redução de 71,3 % em relação ao pico, resultado compatível com estudos que apontam lentidão metabólica e menor atividade enzimática em temperaturas inferiores a 20 °C (Zucareli *et al.,* 2012).

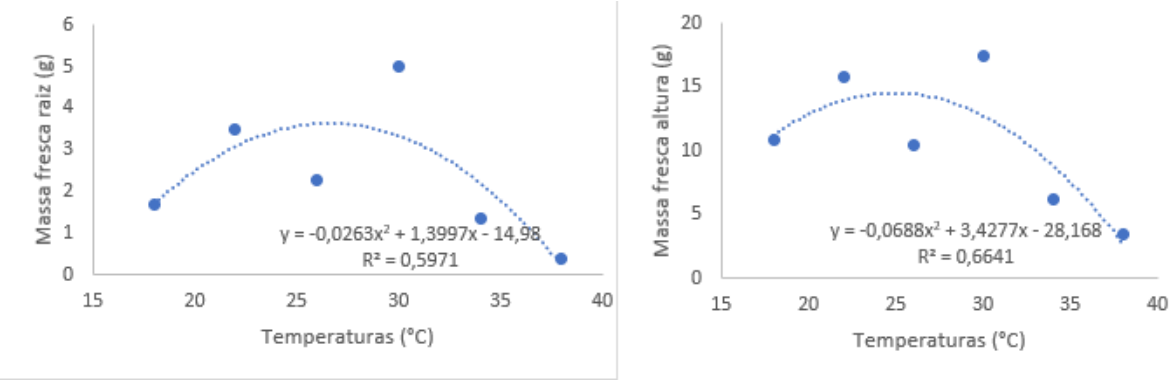
A 34 °C, a altura foi reduzida em 50% (13,57 cm), indicando prejuízos atribuídos ao estresse térmico, como fechamento estomático e desbalanço no metabolismo energético, conforme descrito por Silva *et al.* (2019). Esses dados reforçam que temperaturas moderadas, entre 25°C e 30°C, promovem o maior acúmulo de biomassa aérea na soja, enquanto extremos térmicos comprometem a eficiência fisiológica da cultura.

A análise da massa fresca, tanto do sistema radicular quanto da parte aérea, revelou influência significativa da temperatura ($p < 0,05$), conforme demonstrado na Tabelas 1 a massa verde da raiz apresentou coeficiente de variação de 33,59%, com média geral de 2,69 g, enquanto a parte aérea obteve média de 10,67 g e coeficiente de variação de 35,17%. Ambos os parâmetros se ajustaram a modelos quadráticos, com maiores valores observados nas faixas térmicas intermediárias.

A Figura 4 ilustra as médias obtidas para a massa verde da raiz e da parte aérea em função das temperaturas testadas. Observa-se que a faixa entre 26 °C e 30 °C proporcionou os maiores acúmulos de biomassa fresca em ambas as estruturas, com declínio progressivo a partir de 34 °C. Esses resultados reforçam que o equilíbrio fisiológico da soja durante a fase inicial é favorecido por condições térmicas moderadas, enquanto temperaturas extremas comprometem a produção de biomassa.

Os elevados coeficientes de variação observados para massa fresca e massa seca refletem a grande variabilidade individual das plântulas nessa fase inicial, situação comum em experimentos com estresse térmico. Ainda assim, o teste F indicou efeito significativo do fator temperatura, permitindo interpretação confiável das tendências gerais.

Figura 4- médias da massa verde da raiz e massa verde da parte aérea submedida a diferentes temperaturas com inoculação de *Azospirillum brasilense*, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo - RS, 2025.




Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A massa fresca das raízes ajustou-se a um modelo quadrático, indicando o um (PMET) a 26,6°C, com pico de desenvolvimento observado a 30 °C (4,981 g) e expressiva redução a 38 °C (0,391 g). Essa tendência indica que temperaturas mais elevadas comprometem a atividade fisiológica da raiz, limitando a absorção de água e nutrientes, conforme descrito por Zhang *et al.* (2022), que observaram reduções significativas no crescimento radicular de soja sob calor, acompanhadas de alterações morfofisiológicas relacionadas ao estresse oxidativo. Essa redução também pode estar associada à diminuição da eficiência das rizobactérias promotoras de crescimento, como o *Azospirillum brasilense*, em ambientes acima de 34 °C, conforme sugerido por Glick (2020), que destacou a sensibilidade térmica de PGPRs à desestruturação de suas funções metabólicas sob estresse abiótico.

De forma semelhante, a massa fresca da parte aérea atingiu (PMET) a 24,9°C com um valor máximo de massa fresca a 30 °C (17,373 g), apresentando queda acentuada em 38 °C (3,397 g). Resultados compatíveis foram reportados por Bashir *et al.* (2025), que evidenciaram redução da massa da parte aérea em plântulas de soja sob temperaturas elevadas, associando essa limitação à inibição da fotossíntese, ao fechamento estomático e à menor eficiência na translocação de fotoassimilados. Assim, as evidências demonstram que a faixa entre 26 °C e 30 °C favorece o acúmulo de biomassa, enquanto extremos térmicos afetam negativamente o crescimento vegetativo inicial da cultura.

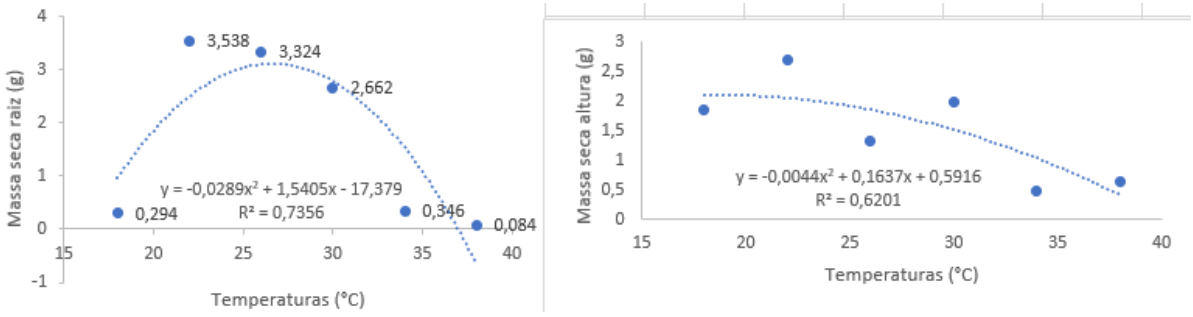
A análise estatística indicou efeito significativo da temperatura sobre a massa seca das raízes ($p < 0,0001$) e da parte aérea ($p = 0,0122$), conforme demonstrado na

Tabela 1. A biomassa radicular ajustou-se a um modelo quadrático, com valor máximo de 3,162 g observado a 30 °C, seguido por declínio progressivo até atingir 0,215 g a 38 °C. Esse comportamento sugere que o acúmulo de matéria seca em raízes é favorecido por temperaturas moderadas, possivelmente devido ao equilíbrio entre absorção hídrica e metabolismo radicular. De acordo com Neumaier *et al*. (2020), temperaturas superiores a 32 °C reduzem significativamente o crescimento das raízes de soja, mesmo sob estímulo de biofertilizantes.

Para a parte aérea, os maiores valores de massa seca também foram registrados entre 26 °C e 30 °C, com pico de 2,925 g em 30 °C. Em 38 °C, observou-se uma redução para 0,406 g. Esse desempenho inferior sob temperaturas extremas pode estar associado a menor taxa fotossintética, redução da expansão foliar e desbalanceamento na alocação de assimilados, conforme discutido por Neumaier *et al*. (2020).

A Figura 5 mostra essa tendência, indicando que a faixa entre 26 °C e 30 °C proporciona melhor acúmulo de biomassa seca em plantas inoculadas com *Azospirillum brasilense*, enquanto as temperaturas mais baixas ou elevadas reduzem expressivamente o desempenho fisiológico da cultura.

Figura 5. Médias da massa seca da raiz e da massa seca da parte aérea de plântulas de soja, em resposta a diferentes temperaturas, sob inoculação com *Azospirillum brasilense.*




Fonte: elaborado pelo autor (2025)

A análise da massa seca demonstrou a sensibilidade da soja às variações térmicas, apresentando comportamento quadrático tanto para a raiz quanto para a parte aérea com (PMET) 26,6°C e 18,6°C. respectivamente. O acúmulo de biomassa radicular foi maximizado em temperaturas intermediárias, com destaque para 3,538 g a 22 °C. No entanto, a 38 °C, observou-se uma redução expressiva, com média de

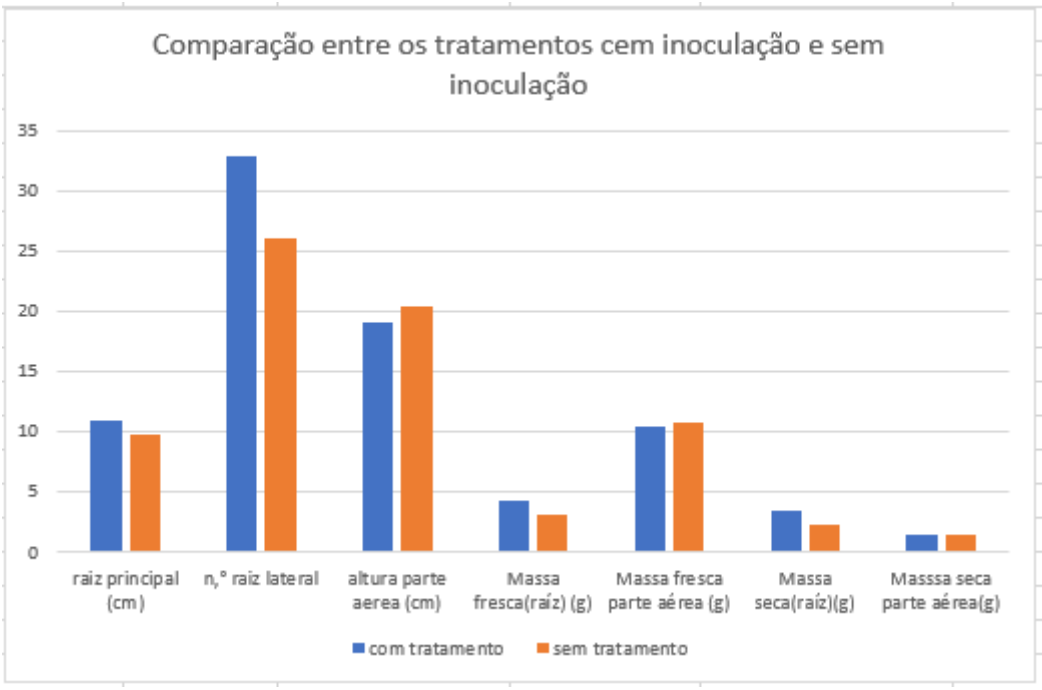
apenas 0,084 g, sugerindo elevada vulnerabilidade do sistema radicular ao estresse térmico. Esse desempenho inferior pode ser atribuído à intensificação da respiração celular, à desestabilização das membranas e à redução na atividade de enzimas associadas ao crescimento, fatores já relacionados ao colapso fisiológico sob calor excessivo.

A massa seca da parte aérea seguiu tendência semelhante ($R^2$ = 0,6201), embora o declínio tenha sido menos acentuado, o que pode estar associado à atuação de mecanismos compensatórios, como o fechamento estomático e o redirecionamento de assimilados. Ainda assim, os valores obtidos indicam que temperaturas extremas comprometem a assimilação de carbono e a expansão foliar.

Em conjunto, os resultados sugerem que o intervalo térmico entre 25 °C e 30 °C é o mais adequado para o acúmulo de biomassa em plântulas de soja inoculadas com *Azospirillum brasilense*, enquanto temperaturas elevadas afetam negativamente a fisiologia da cultura, sendo os tecidos radiculares os mais sensíveis às condições de estresse térmico.

A avaliação do efeito da inoculação com A. brasilense na temperatura de 26 °C foi conduzida por meio de análise descritiva, sem a aplicação de testes estatísticos inferenciais para esta condição específica, a mesma indicou diferenças nas respostas morfológicas das plântulas em comparação à testemunha não inoculada. Conforme apresentado na Figura 6, o tratamento com inoculante resultou em maiores médias de comprimento da raiz principal (11,40 cm), número de raízes laterais (36,25) e massa fresca radicular (5,89 g), enquanto a testemunha apresentou valores inferiores (9,10 cm, 22,25 e 3,89 g, respectivamente). Para a parte aérea, a inoculação também esteve associada a maior altura e acréscimo na massa seca, embora com menor magnitude. Esses dados apontam para maior desenvolvimento do sistema radicular em presença do microrganismo, possivelmente relacionado à produção de fitormônios e estímulo fisiológico já descrito na literatura (Prando *et al*., 2022). Para a parte aérea, embora as diferenças tenham sido menores, observou-se maior altura e massa seca nas plântulas inoculadas, reforçando a contribuição do inoculante para o vigor inicial da cultura, mesmo em condições térmicas ideais, conforme em anexo.

Figura 6. médias do efeito Azospirillum brasilense na temperatura de 26°C, em experimento conduzido sob DIC. Cerro Largo - RS, 2025.




Fonte: elaborado pelo autor (2025)

# 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A temperatura influenciou significativamente o desenvolvimento inicial da soja, com respostas morfofisiológicas compatíveis com comportamento quadrático para as variáveis temperatura. As maiores médias foram observadas entre 25 °C e 30 °C, especialmente para o comprimento da raiz principal, número de raízes laterais, massa radicular e altura da parte aérea. Temperaturas superiores a 30 °C reduziram o crescimento, indicando efeito negativo do estresse térmico nas condições avaliadas.

A inoculação com *Azospirillum brasilense* em 26 °C onde foi realizado testes com e sem inoculação e posteriores comparações através de teste de médias, (sem ANOVA), observou-se que resultou em aumento nas variáveis relacionadas ao sistema radicular, sem alterações expressivas na parte aérea. Os resultados confirmam que a temperatura moderada favorece o desempenho inicial da soja e que o uso do inoculante pode contribuir positivamente para o desenvolvimento radicular nessa condição.

A ausência de diferença na parte aérea sugere que os efeitos iniciais da inoculação se concentram no subsolo, sendo possível que impactos mais significativos na biomassa aérea venham a ser verificados em estágios mais avançados do desenvolvimento vegetal. Assim, a continuidade do experimento em fases posteriores poderá auxiliar na compreensão da influência prolongada do inoculante sobre a dinâmica de crescimento da planta ao longo de seu ciclo.

## REFERÊNCIAS


BASHIR, Hassan et al. Impacto do estresse térmico no crescimento e nos parâmetros fisiológicos de variedades de soja na fase de plântula. In: **BIO Web of Conferences** . EDP Sciences, 2025. p. 01015.

BECKERT, Osmar Paulo; MIGUEL, Marcelo Hissnauer; MARCOS FILHO, Júlio. Absorção de água e potencial fisiológico em sementes de soja de diferentes tamanhos. **Scientia agricola**, v. 57, p. 671-675, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Exportações brasileiras**: soja em grão. Brasília, DF, [2024]. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/relacoes-internacionais/Sojaemgros.pdf. Acesso em: 19 nov. 2025

CAMPOS, Arlene Santisteban. Lâmina e frequência de irrigação, substrato e adubação na aclimatização de mudas micropropagadas de antúrio (Anthurium maricense). 2017.

CASSÁN, Fabricio; DIAZ-ZORITA, Martín. Azospirillum sp. na agricultura atual: do laboratório ao campo. **Biologia e Bioquímica do Solo** , v. 103, p. 117-130, 2016.

CHEBROLU, K. K. et al. Impacto do estresse térmico durante o desenvolvimento das sementes no metaboloma das sementes de soja. **Metabolites**, Basel, v. 6, n. 3, p. 28, 2016. Disponível em: https://cafnrfaculty.missouri.edu/krishnanlab/wp-content/uploads/sites/20/2019/05/Metabolome-Heat_stress.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

CONAB. **Portal de informações agropecuárias**: série histórica de grãos. Brasília: Conab, [20--]. Disponível em: https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html. Acesso em: 20 nov. 2025.

CUNHA, L. R. C. da et al. Tolerance of *Azospirillum brasilense* strains to salinity and high temperatures. Archives of Microbiology, [S.l.], v. 206, p. 202, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00203-024-03895-7. Acesso em: 1 dez. 2025.

DALL'AGNOL, Amélio. **A saga da soja**: de 1050 a.C. a 2009 d.C. Londrina: Embrapa Soja, 2010.

DRESSLER, A. L. et al. Eficácia da inoculação e coinoculação de bactérias na semente e por pulverização na cultura da soja. **Observatório de La Economía Latinoamericana,** Curitiba, v. 23, n. 10, e11773, 2025.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2023/24)**. Londrina: Embrapa Soja, [2024]. Disponível em: https://www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 22 nov. 2025.

FARIAS, José Renato B.; NEPOMUCENO, Alexandre L.; NEUMAIER, Norman. Ecofisiologia da soja. **Embrapa Soja. Circular técnica**, v. 48, 2007.

FERNANDES, Déborah. **Panorama da produção de biodíesel no Brasil**. Nutrição de Safras, 6 ago. 2024. Disponível em: https://nutricaodesafras.com.br/biodiesel Acesso em: 25 nov. 2025.

FONSECA DE LIMA, Cassio Flavio et al. Getting to the root of belowground high temperature responses in plants. Journal of Experimental Botany, v. 72, n. 21, p. 7404-7413, 2021.

FRANÇA NETO, J. B.; Krzyzanowski, Francisco Carlos. O Vigor e o Desempenho das Sementes. **ABRASEM—Associação Brasileira de Sementes e Mudas**: Anuário, Brasília, p. 26-30, 2018.

FRANÇA-NETO, J. B. et al. Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 84 p. (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n.380).

GLICK, B. R. Beneficial Plant-Bacterial Interactions. 2. ed. Cham: Springer, 2020.

GLICK, Bernard R. Bactérias promotoras do crescimento vegetal: mecanismos e aplicações. Scientifica, v. 2012, n. 1, p. 963401, 2012. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.6064/2012/963401 Acesso em: 20 nov. 2025.

HUNGRIA, M. Azospirillum: um velho novo aliado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 32., 2016, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016.

HUNGRIA, M. Inoculação com *Azospirillum brasilense*: inovação em rendimento a baixo custo. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 36p. 2023.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja**. 3. ed. atual. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 64 p. (Coleção Plantar, 72).

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Tecnologia de coinoculação da soja com Bradyrhizobium e Azospirillum: incrementos no rendimento com sustentabilidade e baixo custo. In: **Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Reunião de pesquisa de soja da região central do Brasil**. 2013.

KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos; FRANÇA-NETO, J. de B.; HENNING, Ademir Assis. A alta qualidade da semente de soja: fator importante para a produção da cultura. 2018.

LANDGRAF, Lebna. **Brasil lidera e é referência no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, [2023]. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/81613580/brasil-e-referencia-no-desenvolvimento-de-tecnologias-sustentaveis-para-producao-de-soja. Acesso em: 30 nov. 2025.

LIBÓRIO, Paloma Helena et al. Coinoculação de *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense* na qualidade fisiológica de sementes de soja**. Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 6, supl2, p. 2937-2950, 2020.

MARCOS-FILHO, Julio. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Londrina: ABRATES, 2015. 660 p.

MERCANTE, F. M. et al. Estratégias para aumentar a eficiência de inoculantes microbianos na cultura da soja. 2011.

MUNHOZ, André. **Técnicas de inoculação com bactérias de fixação de nitrogênio na cultura da soja**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/165898/T%C3%89CNICAS%20DE%20INOCULA%C3%87%C3%83O%20COM%20BACT%C3%89RIAS%20DE%20FIXA%C3%87%C3%83O%20DE%20NITROGENIO%20NA%20CULTURA%20DA%20SOJA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 20 nov. 2025.

NEUMAIER, N. et al. Ecofisiologia da soja. *In*: SEIXAS, C. D. S. et al. (Ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. Cap. 2. p. 13-34. (Sistemas de Produção, 17). Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1128387/ecofisiologia-da-soja. Acesso em: 15 nov. 2025.

PRANDO, A. M. et al. Coinoculação da soja com Bradyrhizobium e Azospirillum na safra 2020/2021 no Paraná. 2022.

REIS, Verônica Massena. **O inoculante para gramíneas**. Embrapa, 2014. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2099661/artigo-o-inoculante-para-gramineas. Acesso em: 22 nov. 2025.

RODRIGUES, M. J. M. **Desempenho agronômico de híbridos de milho sob inoculação com *Azospirillum brasilense* em diferentes regimes térmicos**. 2022. 105 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22332. Acesso em: 1 dez. 2025.

SCHWEIG, Luis Augusto; DE OLIVEIRA LOURENÇO, Edneia Santos;

MENEGASSO, Gustavo Dias. Inoculante de longa vida na cultura da soja sob plantio direto. Revista Faz Ciência, v. 19, n. 30, p. 99-99.

SEIXAS, Claudine Dinali Santos et al. (ed.). Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 2020. (Sistemas de Produção, 17). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1123928/1/SP-17-2020-online-1.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025

SILVA, M. P. et al. Efeito da temperatura no desempenho fisiológico de sementes de soja. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 6, n. 3, p. 34–41, 2019

SOUSA, Rennan Martins de Alcântara. Desempenho fisiológico de sementes de soja em resposta ao estresse hídrico e térmico na fase germinativa. 2021.

SOUZA, A. G.; SMIDERLE, O. J. Cultura da soja: radiação solar, acúmulo de matéria seca e suas interações para alta produtividade. In: **CIÊNCIAS AGRÁRIAS: TECNOLOGIA, SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO-VOLUME 1**. Editora Científica Digital, 2024. p. 84-107.

SOUZA, Alyne Ayla Rodrigues de. Características agronômicas da soja inoculada via sulco com diferentes velocidades de semeadura. 2024.

STRECK, N. A. et al. Desenvolvimento vegetativo e produtividade da soja em diferentes épocas de semeadura. Ciência Rural, v. 35, n. 6, p. 1273–1280, 2005.

WASMUTH, D. J. et al. Diferentes formas de aplicação de *Azospirillum brasilense* na cultura do feijão comum. **Scientific Electronic Archives**, Sinop, v. 16, n. 4, p. 74-79, 2023. Disponível em: https://scientificelectronicarchives.org/index.php/SEA/article/view/1997. Acesso em: 1 dez. 2025.

ZHANG, L. et al. Heat stress reduced shoot and dry root weight and induced oxidative damage in soybean. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9549248/ . Acesso em: 1 dez. 2025.

ZUCARELI, C. et al. Emergência e crescimento inicial de plântulas de milho doce em função da temperatura. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 1747–1754, 2012.

ZILLI, Jerri Édson et al. Inoculação da soja com Bradyrhizobium no sulco de semeadura alternativamente à inoculação de sementes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1875-1881, 2010.