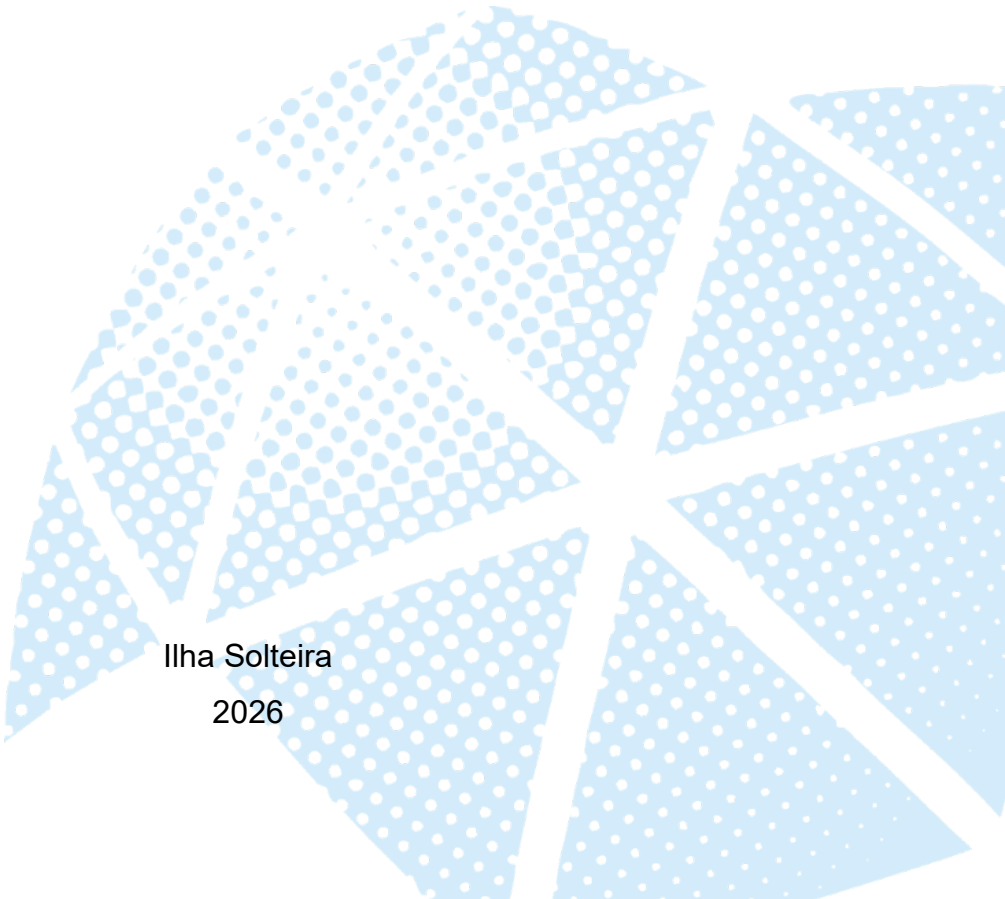


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ALINE MARCHETTI SILVA MATOS

**ESTRATÉGIAS DE INOCULAÇÃO DE MICRORGANISMOS NA PRODUTIVIDADE DA
SOJA E DAS CULTURAS DA ROTAÇÃO E NA QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO**



Ilha Solteira
2026

ALINE MARCHETTI SILVA MATOS

**ESTRATÉGIAS DE INOCULAÇÃO DE MICRORGANISMOS NA PRODUTIVIDADE DA
SOJA E DAS CULTURAS DA ROTAÇÃO E NA QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, para obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Área de Concentração: Sistemas de Produção

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Andreotti

Coorientadora: Prof^a. Dra. Carolina Batista dos Santos Bonini

Ilha Solteira -SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Matos, Aline Marchetti Silva.

M433e Estratégias de inoculação de microrganismos na produtividade da soja e das culturas da rotação e na qualidade do solo em sistema plantio direto consolidado / Aline Marchetti Silva Matos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
166 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2026

Orientador: Marcelo Andreotti

Coorientador: Carolina Batista dos Santos Bonini

Inclui bibliografia

1. Bactérias promotoras de crescimento de plantas. 2. Atributos do solo. 3. Glycine max. 4. *Sorghum bicolor*. 5. *Urochloa brizantha*. 6. Sustentabilidade.

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

Compreensão sobre a coinoculação (uso conjunto de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*) e a inoculação adicional com *Bradyrhizobium* no estágio R1 da soja, e como esses microrganismos afetaram o sistema como um todo. Demonstramos na presente pesquisa que o uso dessas bactérias promoveu melhorias significativas na saúde do solo, sendo considerada uma tecnologia segura e eficiente para manter a integridade física, química e biológica do solo, incrementando na produtividade das culturas em Sistema Plantio Direto. A prática é economicamente viável em virtude da Fixação Biológica de Nitrogênio que permite a redução ou exclusão do uso de fertilizantes nitrogenados minerais por serem de baixo custo em comparação aos fertilizantes minerais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

Understanding of co-inoculation (the combined use of *Bradyrhizobium* and *Azospirillum*) and additional inoculation with *Bradyrhizobium* at the R1 stage of soybean growth, and how these microorganisms affected the system as a whole. In this study, we demonstrated that the use of these bacteria led to significant improvements in soil health and is considered a safe and efficient technology for maintaining the physical, chemical, and biological integrity of the soil, thereby increasing crop productivity in no-till farming systems. The practice is economically viable due to biological nitrogen fixation, which allows for the reduction or elimination of mineral nitrogen fertilizers, as these microorganisms are low-cost compared to mineral fertilizers.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EFEITOS DA ATUAÇÃO DE MICRORGANISMOS NA PRODUTIVIDADE DE CULTURAS E QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DE CULTURAS EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO

AUTORA: ALINE MARCHETTI SILVA MATOS **ORIENTADOR:**

MARCELO ANDREOTTI

COORIENTADORA: CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO ANDREOTTI**
Data: 29/06/2026 08:44:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO**
Data: 04/08/2026 09:27:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **BARBARA PEREIRA CHRISTOFARO SILVA**
Data: 04/08/2026 15:07:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. BARBARA PEREIRA CHRISTOFARO SILVA (Participação Virtual)

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
 **DEYVISON DE ASEVEDO SOARES**
Data: 29/06/2026 13:10:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. DEYVISON DE ASEVEDO SOARES (Participação Virtual) Campo Verde Pesquisas Agrônômicas

Profa. Dra. ELISANGELA DUPAS (Participação Virtual)

Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Documento assinado digitalmente
 **ELISANGELA DUPAS**
Data: 29/06/2026 10:42:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ilha Solteira, 26 de junho de 2026

Dedico este trabalho a minha mãe Elza
Penteado Marchetti
(*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao meu marido Diogo Tiago da Silva, pelo apoio, amor incondicional e paciência, e à minha filha Laura, por ser a luz que ilumina o meu caminho. Esta conquista é nossa.

À minha família, pelo carinho e confiança.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Andreotti pela oportunidade de aprendizado e pelo privilégio da convivência acadêmica. Agradeço não apenas pela orientação técnica, mas também pelo exemplo de dedicação à ciência, paciência e pelo compartilhamento de seus vastos conhecimentos, que foram fundamentais para a minha formação como pesquisadora. Minha eterna admiração e gratidão.

À minha coorientadora, Prof^a. Dra. Carolina Batista dos Santos Bonini, pelo apoio técnico, pelas valiosas sugestões e pela parceria.

A todos os membros do Grupo de pesquisa Equipe Andreotti, pelo auxílio imprescindível em cada etapa desta pesquisa. Agradeço pelas incontáveis horas de trabalho no campo e laboratório, pelas discussões técnicas e, acima de tudo, pela amizade e parceria que tornaram os dias de coleta e análises muito mais leves. Sem o esforço coletivo de vocês, este trabalho não seria possível.

A todos os colaboradores da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), Câmpus de Ilha Solteira, pelo apoio durante a realização deste trabalho. Em especial, agradeço aos servidores César, Polaco, Alvino, Junior e Wesley, pelo comprometimento e contribuições de cada um de vocês.

À Prof. Dra. Thais Soto Boni e aos discentes Matheus Candil e Ana Clara Britto do laboratório de Pedologia e Recuperação Ambiental da Unesp-Ilha Solteira, pelo apoio fundamental nas análises enzimáticas e biológicas do solo.

Aos Laboratórios de Fertilidade do solo, Física do Solo, Nutrição de Plantas da Unesp-Ilha Solteira, pela realização das análises laboratoriais. Agradeço pelo excelente trabalho dos técnicos Carlos, Silvia, Silvelise, Marcelo Rinaldi e Kaway Nunes.

Aos Laboratórios de Microbiologia e Matéria Orgânica do Solo da

ESALQ/USP-Piracicaba, pela realização das análises laboratoriais e excelente trabalho dos técnicos Denise e Luís Fernando.

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

Aos amigos e amigas, Patrick Ferreira, Philippe Toledo, Maria Luana, Thays Couto, Naiane Ribeiro, obrigada pelas palavras de apoio, pelos momentos de alegria e pelo incentivo constante.

RESUMO

O uso de sistemas agrícolas diversificados que adotem práticas culturais integradas levam a melhor qualidade dos alimentos e ambiental, que aliado ao Sistema Plantio Direto e o uso de microrganismos promotores de crescimento de plantas, são estratégias para incrementar a produtividade das culturas por meio da adição de matéria orgânica, que impactam nos atributos físico-químicos e microbiológico do solo. No entanto, deve-se incrementar o conhecimento da real extensão em que essas práticas agrícolas de inoculação, coinoculação e inoculação adicional de rizóbios podem impactar na soja e o capim em sucessão. Com base nessa premissa, objetivou-se: avaliar os efeitos dos diferentes tipos de inoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense*, e inoculação adicional de *Bradyrhizobium elkanii* no estágio R1 da soja, e se essas bactérias promovem alterações nos componentes de produção e produtividade da soja em sistema plantio direto (SPD), e verificar o efeito residual dos tratamentos da soja sobre o capim em sucessão e na qualidade do solo. O experimento foi conduzido em Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp, nas safras 2022/23, 2023/24 e 2024/25, em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições em esquema fatorial 4 x 2, sendo os tratamentos: T1 (Controle sem inoculação), T2 (*B. elkanii* nas sementes), T3 (*B. elkanii* + *A. brasilense* no sulco de semeadura), T4 (*B. elkanii* nas sementes + *A. brasilense* nas sementes), combinados com ou sem pulverização de *Bradyrhizobium elkanii* no solo em área total da soja em estágio R1. No estágio R3 (formação das vagens) da soja foram avaliadas as trocas gasosas e fotossíntese, número e massa de nódulos por planta e nutrição foliar. Na colheita da soja (estádio R8) foram avaliados os componentes de produção e produtividade da soja. Após os cultivos de soja (safras 2022/23, 2023/24) foi semeado o consórcio de sorgo com capins da espécie *Urochloa brizantha*, do qual foi avaliada a produção de matéria fresca e seca (abril a setembro) e produção de palhada para semeadura da soja em SPD, enquanto que no sorgo grânifero, foram avaliados os componentes de produção e produtividade de grãos. Após o cultivo da soja em 2023/24 e 2024/25 foram coletadas amostras de solo em três profundidades para realizar as análises físicas, químicas, biológicas e enzimáticas (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m). Os resultados evidenciaram que o uso das bactérias aliado com SPD consolidado promoveu melhorias na saúde biológica do solo com aumentos expressivos na atividade metabólica na safra de 2025. A coinoculação resultou em maiores valores de pH, cálcio e CTC no solo, e na produtividade, o sorgo apresentou incrementos na produtividade em 2023. Na soja, a população de plantas e a nodulação foram preditores positivos da produtividade, evidenciando a eficiência da fixação biológica de nitrogênio e o estímulo radicular pela *Azospirillum*. Conclui-se que o manejo biológico da *Bradyrhizobium elkanii* e *A. brasilense* via coinoculação e inoculação adicional foi eficiente para o cultivo das plantas e promoveu melhorias química, biológica e enzimática do solo, quando associados com o SPD e rotação de culturas, garantiu estabilidade produtiva dos cultivos, de forma sustentável no cerrado brasileiro.

Palavras-chave: bactérias promotoras de crescimento de plantas; atributos do solo; *Glycine max*; *Sorghum bicolor*; *Urochloa brizantha*; sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of diversified agricultural systems that adopt integrated cultural practices leads to better food and environmental quality. Combined with the No-Tillage System (NTS) and the use of plant growth-promoting bacteria, these strategies aim to increase crop yield through organic matter addition, which impacts the physical, chemical, and microbiological attributes of the soil. However, it is necessary to increase knowledge regarding the true extent to which agricultural practices of rhizobia inoculation, coinoculation, and additional inoculation can affect soybean and succession grass. Based on this premise, the objectives of this study were: to evaluate the effects of different types of *Bradyrhizobium elkanii* and *Azospirillum brasilense* inoculation, alongside additional *Bradyrhizobium elkanii* inoculation at the soybean R1 stage, to determine whether these bacteria induce changes in yield components and productivity of soybean under NTS, and to verify the residual effect of soybean treatments on succession grass and soil quality. The experiment was conducted in Selvíria, Mato Grosso do Sul, Brazil, at the Teaching, Research, and Extension Farm of Unesp, during the 2022/23, 2023/24, and 2024/25 growing seasons, using a randomized block design with four replications in a 4 x 2 factorial scheme. The treatments consisted of: T1 (Uninoculated control), T2 (*B. elkanii* on seeds), T3 (*B. elkanii* + *A. brasilense* in the furrow), and T4 (*B. elkanii* on seeds + *A. brasilense* on seeds), combined with or without spraying *Bradyrhizobium elkanii* on total soil area at the soybean R1 stage. At the soybean R3 stage (pod formation), gas exchange, photosynthesis, number and dry weight of nodules per plant, and leaf nutrition were evaluated. At harvest (R8 stage), yield components and soybean grain yield were evaluated. Following the soybean crops (2022/23 and 2023/24 seasons), a intercropping system of sorghum and *Urochloa brizantha* grass species was sown, from which fresh and dry matter production (April to September) and straw production for soybean sowing under NTS were evaluated, while yield components and grain yield were evaluated for grain sorghum. After the 2023/24 and 2024/25 soybean crops, soil samples were collected at three depths (0,00–0,10, 0,10–0,20, and 0,20–0,40 m) to analyze physical, chemical, biological, and enzymatic attributes. The results showed that the use of bacteria combined with consolidated NTS promoted improvements in soil biological health, with significant increases in metabolic activity in the 2025 season. Coinoculation resulted in higher soil pH, calcium content, and CEC, while sorghum showed grain yield increases in 2023. In soybean, plant population and nodulation were positive predictors of yield, highlighting the efficiency of biological nitrogen fixation and root stimulation by *Azospirillum*. It is concluded that the biological management of *Bradyrhizobium elkanii* and *A. brasilense* via coinoculation and additional inoculation was efficient for crop cultivation and promoted chemical, biological, and enzymatic improvements in the soil. When associated with NTS and crop rotation, it ensured sustainable yield stability for crops in the Brazilian Cerrado.

Keywords: plant growth-promoting bacteria; soil attributes; *Glycine max*; *Sorghum bicolor*; *Urochloa brizantha*; sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da localização experimental.	28
Figura 2 – A-C. Temperaturas mínima (T _{min}) (°C), média (T _{média}) (°C) e máxima (T _{máx}) (°C), registro da precipitação pluvial (mm) mensal durante o período experimental das safras de 2022 até 2025. Selvíria-MS, 2026.	29
Figura 3 – Esquema da linha do tempo experimental.	33
Figura 4 – Comparativo dos Indicadores bioenzimáticos do solo no início e final do experimento com diferentes estratégias de inoculação da soja.	56
Figura 5 – Matriz de correlação de Pearson entre as atividades enzimáticas do solo no início do período experimental (2023).	57
Figura 6 – Matriz de correlação de Pearson entre as atividades enzimáticas do solo ao final do período experimental (2025).	60
Figura 7 – Teores médios das frações de carbono orgânico do solo (COM, COP e COT) nas safras de 2023 e 2025 em diferentes profundidades de amostragem.	64
Figura 8 – Comparação interanual (2023 vs. 2024) dos parâmetros biométricos e produtivos do sorgo.	88
Figura 9 – Matriz de correlação de Pearson entre atributos de produção e desenvolvimento de sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>) na safra 2023.	89
Figura 10 – Matriz de correlação de Pearson entre atributos de produção e desenvolvimento de sorgo na safra 2024.	91
Figura 11 – Comparação interanual (2023 vs. 2024) dos teores médios de nutrientes na fitomassa dos capins Piatã e Paiaguás.	95
Figura 12 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na biomassa do capim na safra de 2023.	96
Figura 13 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na biomassa do capim na safra de 2024.	97
Figura 14 – Comparação interanual (2023 vs. 2024) da produção de massa seca e verde de capim/palhada.	101
Figura 15 – Comparação interanual (2023, 2024 e 2025) dos teores médios de macronutrientes foliares da soja.	109
Figura 16 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na folha da soja na safra de 2023.	112
Figura 17 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na folha da soja na safra de 2024.	113

Figura 18 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na folha da soja na safra de 2025.	115
Figura 19 – Comparação interanual (2024 e 2025) dos teores médios de clorofila a (CLORO A), b (CLORO B) e total (CLORO T) na cultura da soja, em função dos anos de cultivo....	118
Figura 20 – Médias gerais dos parâmetros de trocas gasosas da soja comparadas entre os anos agrícolas de 2024 e 2025.....	122
Figura 21 – Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros de trocas gasosas da soja nas safras de 2024 (A) e 2025 (B).	125
Figura 22 – Atributos de crescimento, componentes da produção e produtividade da soja em função das safras agrícolas 2023, 2024 e 2025.....	136
Figura 23 – Parâmetros de nodulação e produtividade de grãos da soja nas safras agrícolas 2023, 2024 e 2025.....	138
Figura 24 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis biométricas, componentes de rendimento e nodulação da cultura da soja na safra 2023.	141
Figura 25 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis biométricas, componentes de rendimento e nodulação da cultura da soja na safra 2024.	144
Figura 26 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis biométricas, componentes de rendimento e nodulação da cultura da soja na safra 2025.	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização inicial dos atributos químicos do solo. Selvíria-MS 2022.	31
Tabela 2 – Caracterização inicial dos atributos físicos do solo. Selvíria-MS, 2022.....	31
Tabela 3 – Caracterização inicial dos atributos enzimáticos e biológicos do solo, antes da instalação experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,10 m. Selvíria, MS, 2022.	32
Tabela 4 – Atividades enzimáticas arilsulfatase (Aril), β -glicosidase (Beta), fosfatase ácida (Fosf), teores de carbono da biomassa microbiana (CBM) e atividade respiratória microbiana (ARM), nas safras de 2023 e 2025.	52
Tabela 5 – Médias dos teores de Carbono Orgânico Particulado (COP), Carbono Orgânico Total (COT) e Carbono Orgânico Mineral (COM) no solo em função de diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional nas safras de 2023 e 2025, em três profundidades. ...	63
Tabela 6 – Atributos químicos do solo (macro e micronutrientes) em três profundidades de amostragem, coletados antes da instalação experimental. Selvíria- MS, 2022.	70
Tabela 7 – Atributos químicos do solo em três profundidades de amostragem (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) sob diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional na safra 2022/23.....	71
Tabela 8 – Atributos químicos do solo em três profundidades de amostragem (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) sob diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional na safra 2024/2025.....	72
Tabela 9 – Atributos físicos do solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade) em três profundidades de amostragem, sob diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional no ano de 2025.	75
Tabela 10 – Componentes de produção e produtividade do sorgo em função de estratégias de inoculação e inoculação adicional da soja antecessora, nas safras de 2023 e 2024.....	87
Tabela 11 – Teores de nutrientes na biomassa do capim em função de estratégias de inoculação e inoculação adicional na soja antecessora, nas safras de 2023 e 2024.	92
Tabela 12 – Médias de massa verde e seca dos capins Piatã e Paiaguás e palhada do capim remanescente sob diferentes estratégias de efeito residual da inoculação e inoculação adicional, respectivamente nas safras de 2023 e 2024.....	99
Tabela 13 – Teores de macronutrientes no tecido vegetal (folhas) da soja sob diferentes estratégias de inoculação nas safras de 2023, 2024 e 2025, antes da inoculação adicional de Bradyrhizobium em R1 da soja.	108
Tabela 14 – Índices de clorofila a, b e total na cultura da soja em resposta a estratégias de inoculação e inoculação adicional nas safras de 2024 e 2025.	116
Tabela 15 – Parâmetros fisiológicos de trocas gasosas na cultura da soja sob diferentes manejos de inoculação e inoculação adicional nas safras de 2024 e 2025.....	120

Tabela 16 – Médias dos parâmetros de desenvolvimento vegetativo e componentes de produção da cultura da soja em resposta a diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional nas safras agrícolas 2023, 2024 e 2025. 128

Tabela 17 – Médias dos parâmetros de nodulação, massa de grãos e produtividade da cultura da soja submetida a regimes de inoculação e inoculação adicional nas safras 2023/2024/2025..... 131

Tabela 18 – Parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear simples para a produtividade de grãos (PG) em função das variáveis biométricas e de nodulação de maior correlação nas safras 2023, 2024 e 2025. 148

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	INOCULAÇÃO, COINOCULAÇÃO E INOCULAÇÃO ADICIONAL	17
2.2	IMPORTÂNCIA DA INOCULAÇÃO E INOCULAÇÃO ADICIONAL NASOJA E EFEITOS NAS GRAMÍNEAS DA ROTAÇÃO	18
2.3	BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS E A RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO SOLO	20
2.4	INFLUÊNCIA DOS MICRORGANISMOS INOCULADOS SOBRE A BIOTA "NATIVA" DO SOLO	22
2.5	PRÁTICA DE MANEJO CONSERVACIONISTA E A ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS	24
3	HIPÓTESES	26
4	OBJETIVOS	27
4.1	OBJETIVO GERAL	27
4.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	27
5	MATERIAL E MÉTODOS	28
5.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS	28
5.2	HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL	30
5.3	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	32
5.4	SAFRA DA SOJA	33
5.4.1	Semeadura e condução	33
5.4.2	Avaliação nutricional foliar da soja	34
5.4.3	Número total e massa fresca e seca de nódulos por planta	35
5.4.4	Trocas gasosas, índice de clorofila <i>a</i> e <i>b</i> , e total	35
5.4.5	Avaliações morfológicas e produtivas da soja	36
5.5	SAFRA DO SORGO E CAPIM	37
5.5.1	Semeadura, condução e avaliações do sorgo e capim	37
5.5.2	Avaliação nutricional dos capins	38
5.6	ANÁLISES DO SOLO	39
5.6.1	Fertilidade do solo	39
5.6.2	Física do solo	39
5.6.3	Fracionamento físico da matéria orgânica	39
5.6.4	Análises biológicas e enzimáticas	39
5.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	40
	REFERÊNCIAS	41
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52

7.1	CAPÍTULO 1- ANÁLISES DO SOLO	52
7.1.1	Atividades enzimáticas e biológicas	52
7.1.2	Correlações entre os parâmetros enzimáticos e biológicos do solo no início e final do experimento	57
7.1.3	Fracionamento físico da matéria orgânica	61
7.1.4	Fertilidade do solo	65
7.1.5	Físicas do solo	74
7.1.6	Considerações finais	77
	REFERÊNCIAS	79
7.2	CAPÍTULO 2 - PLANTAS DE COBERTURA (SORGO E CAPINS)	85
7.2.1	Análises do sorgo	85
7.2.1.1	Atributos de desenvolvimento e componentes de produção do sorgo granífero	86
7.2.1.2	Análises de correlação entre os atributos de desenvolvimento vegetativo e produtividade do sorgo nas safras de 2023 e 2024	89
7.2.2	Análises dos capins	92
7.2.2.1	Nutrição dos capins	92
7.2.2.2	Correlações nutricionais na fitomassa da forragem	95
7.2.2.3	Parâmetros de produtividade da palhada dos capins	98
7.2.3	Considerações finais	102
	REFERÊNCIAS	104
7.3	CAPÍTULO 3- ANÁLISES DA SOJA	107
7.3.1	Teor de nutrientes foliar	107
7.3.2	Correlações da análise nutricional foliar das safras de 2023-2025	111
7.3.3	Análises do índice de clorofilas	115
7.3.4	Análises de trocas gasosas	119
7.3.5	Interdependência dos parâmetros fisiológicos (trocas gasosas)	124
7.3.6	Componentes morfológicos e de produção e produtividade de grãos de soja, nas safras 2023, 2024 e 2025	127
7.3.7	Análises de correlação do desenvolvimento vegetativo e produtividade nas safras de 2023-2025	140
7.3.8	Análise de regressão linear entre safras	148
7.3.9	Considerações finais	151
	REFERÊNCIAS	152
8	CONCLUSÃO	166

1 INTRODUÇÃO

Em nível mundial, os sistemas agrícolas estão se expandindo e intensificando o uso do solo, uma vez que, fornecem diversos serviços ecossistêmicos essenciais para a vida humana, por meio da produção de energia e fibras, alimento, sequestro de carbono e purificação da água (Baveye *et al.*, 2020; Jayaramaiah *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

Visto a importância dos desafios dos sistemas agrícolas atuais, ressalta-se a procura global crescente na priorização de opções sustentáveis (Chiriaco *et al.*, 2021).

O cultivo de plantas de cobertura em SPD é comumente utilizado em sistemas de rotação de culturas para beneficiar os serviços ecossistêmicos, aumentar a produtividade e contribuir para a ciclagem de nutrientes nas interações entre solo e planta (Daryanto *et al.*, 2019; Ashworth *et al.*, 2020; Crusciol *et al.*, 2020; Crusciol *et al.*, 2021).

Diante dos efeitos negativos das vulnerabilidades de produção e recursos, surge a necessidade urgente de rever as práticas agrícolas adotando métodos ecologicamente corretos, como diversificação de culturas com leguminosas (Thapa *et al.*, 2017; Kumar *et al.*, 2018; Choudhary *et al.*, 2022; Bana *et al.*, 2023a, Bana *et al.*, 2023b; Rajanna *et al.*, 2023; Kumar e Choudhary, 2023; Shrivastava *et al.*, 2024), e a diversificação temporal das plantas, tal como, a rotação de culturas, que favorece o incremento na produtividade e a sua estabilidade ao longo do tempo, melhorando os serviços ecossistêmicos (Tiemann *et al.*, 2015; Tamburini *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020) e, assim, incrementar a produtividade das plantas em rotação, pois pode haver o efeito direto da ciclagem de nutrientes da palhada, pelo residual das bactérias no solo ou da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) das leguminosas transferido para as gramíneas em rotação.

Com a busca por produção mais sustentável, o uso de técnicas como a inoculação de microrganismos benéficos nas plantas vem ganhando destaque e podem contribuir para o incremento na produção e produtividade vegetal (Dhiman *et al.*, 2022). A inoculação adicional, ou seja, inoculação em cobertura aplicada diretamente no solo, promove a formação de novos nódulos da soja, além de incrementar a disponibilidade de Nitrogênio (N) no decorrer do ciclo da cultura (Sousa *et al.*, 2021; Teixeira *et al.*, 2022). Em relação à coinoculação, as bactérias podem

ser inoculadas separadas ou associadas e atuam em distintos processos microbianos, de forma que os benefícios de cada microrganismo são combinados e resultam em maiores rendimentos da cultura (Santos *et al.*, 2019).

A utilização do consórcio bacteriano com diferentes propriedades benéficas e metabólitos microbianos pode representar uma estratégia simples, barata e sustentável para melhorar o desempenho e o rendimento das plantas. Hipotetizamos que essa prática possa incrementar na produtividade da soja, melhorar os componentes de produção e produtividade do sorgo e capins (Piatã e Paiaguás), além de favorecer a qualidade do solo. Portanto, neste estudo, o objetivo foi determinar os efeitos de um consórcio bacteriano constituído de *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense*, em diferentes combinações sobre a fisiologia, componentes de produção, produtividade de grãos e/ou biomassa da soja, sorgo e biomassa dos capins, e a qualidade do solo em condições de campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INOCULAÇÃO, COINOCULAÇÃO E INOCULAÇÃO ADICIONAL

A inoculação refere-se a um processo por meio do qual utilizam-se bactérias fixadoras de nitrogênio que são adicionadas às sementes, momentos antes da semeadura. As bactérias são inseridas em um produto denominado inoculante, para ser usado na agricultura. Dessa forma, a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) ocorre de forma manipulada, por meio do uso do inoculante, composto por estirpes selecionadas e adaptadas às diferentes condições ambientais (Cassini e Franco, 2006; Gualter, 2010).

Em relação à coinoculação, as bactérias podem ser inoculadas separadamente ou associadas. É a combinação de espécies ou cepas que atuam em distintos processos microbianos, de forma que os benefícios de cada microrganismo são combinados e resultam em maiores rendimentos da cultura. Como exemplo, a interação entre microrganismos que realizam o processo de FBN (*Bradyrhizobium* spp., *Rhizobium* spp.) e os que realizam a produção de fitohormônios (*Azospirillum* spp., *Pseudomonas* spp.), solubilizam fosfatos e promovem o controle biológico de pragas e doenças (*Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp.), respectivamente (Santos *et al.*, 2019).

A inoculação adicional consiste na inoculação direta do solo e/ou planta em conjunto com a aplicação do inoculante, após a implantação da cultura, ou seja, inoculação em cobertura. No caso da soja, o inoculante é aplicado diretamente no solo, com a finalidade de promover a formação de novos nódulos, além de incrementar a disponibilidade de N no decorrer do ciclo cultural (Sousa *et al.*, 2021; Teixeira *et al.*, 2022).

A soja não é nativa do Brasil, porém, o sucesso da alta produtividade é proveniente de mais de meio século de pesquisas relacionadas à seleção de genótipos vegetais e cepas de inoculantes e tecnologias de inoculação desenvolvidos para as condições edafoclimáticas do Brasil (Hungria *et al.*, 2006; Hungria e Mendes, 2015; Santos *et al.*, 2019). Na introdução de microrganismos no solo via inoculação, ocorre o estabelecimento da população de *Bradyrhizobium* na soja, o que favorece a FBN (Thies *et al.*, 1991; Thies *et al.*, 1995; Hungria *et al.*, 2006). Ademais, as vantagens proporcionadas pela inoculação levaram o Brasil a

aumentar a taxa de adesão dessa tecnologia pelos produtores, de modo que foram comercializados 70 milhões de doses de inoculantes de *Bradyrhizobium* nas safras de 2018 e 2019 (Santos *et al.*, 2019).

Contudo, pesquisas realizadas no Brasil, Argentina e demais países produtores de soja da América do Sul, demonstraram que a inoculação adicional anualmente, mesmo em solos com alta população de *Bradyrhizobium* estabelecidos na soja, resultou em incremento na FBN e rendimento de grãos em 8% (Hungria *et al.*, 2006; Hungria *et al.*, 2013; Hungria e Mendes, 2015; Hungria *et al.*, 2020), o que tornou tal prática interessante no incremento de produtividade e de palhada para o SPD.

Cada vez mais, tem-se demonstrado o interesse dos agricultores pela coinoculação. A coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum brasilense* na soja demonstrou incremento em até duas vezes mais na produtividade de grãos, quando comparada com a inoculação única, em dados gerados após o ano agrícola de 2013 (Hungria *et al.*, 2013; Hungria *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2021). Em um período de cinco anos, houve adoção dessa prática em 25% da área cultivada com soja no Brasil, o que corresponde a aproximadamente 10 milhões de hectares (Santos *et al.*, 2021). O benefício de tal prática reside no fato da *Azospirillum* incrementar a produção de fitohormônios, que aumenta o volume radicular e de pelos radiculares, com provável maior infecção pela *Bradyrhizobium*, e assim aumentar a FBN, bem como pela maior exploração do solo pelo sistema radicular, o que pode tornar a planta menos suscetível ao déficit hídrico (Franchi, 2020). Também pela ação de maior crescimento das plantas, que pode incrementar a biomassa vegetal, e consequentemente após a colheita, incrementar a palhada para o SPD.

2.2 IMPORTÂNCIA DA INOCULAÇÃO E INOCULAÇÃO ADICIONAL NA SOJA E EFEITOS NAS GRAMÍNEAS DA ROTAÇÃO

O nitrogênio (N) é o elemento mais limitante para o crescimento vegetal e a adubação mineral é comumente utilizada (Silva *et al.*, 2020) nas culturas em geral. Porém, o fertilizante mineral possui alto custo e contribui para a emissão de gases de efeito estufa (Bourscheidt *et al.*, 2019). Com a alta demanda por esse nutriente, a inoculação bacteriana (Santos *et al.*, 2021) e o cultivo de leguminosas em rotação (Boddey *et al.*, 2020), são tecnologias promissoras para promover o incremento da

produtividade e sustentabilidade de milhões de hectares de sistemas agrícolas e pastagens. Ademais, o uso de inoculantes é uma abordagem que segue as demandas atuais de sustentabilidade agrícola, econômica, ambiental e social (Hungria *et al.*, 2013).

Além disso, pode ocorrer o incremento na Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) proporcionado pelo *Bradyrhizobium*. Outro benefício é a redução ou exclusão do uso de fertilizantes nitrogenados na soja (Fagundes, 2019), contribuindo na formação da planta e consequente aumento na produtividade. A ciclagem de nutrientes ocorre após a inoculação nas plantas usadas como adubos verdes ou plantas de cobertura (Franchi, 2020), pelo incremento da FBN e crescimento vegetal que gera palhada no sistema.

Bactérias do gênero *Azospirillum* produzem o ácido indolacético (AIA) (Santos *et al.*, 2021) favorecendo o crescimento radicular, promovendo a divisão e o alongamento celular nas raízes, tornando-o mais volumoso e, portanto, com maior possibilidade de explorar maior volume de solo, e facilitar o acesso à água subterrânea, influenciando diretamente nos nódulos da planta e absorção de nutrientes (Franchi, 2020), resultando em uma planta vigorosa e produtiva. Ainda há relatos de incrementos na fotossíntese foliar, tal como, melhorias no índice de clorofila e produção de biomassa (Tien *et al.*, 1979; Bashan *et al.*, 2004), além de proporcionar maior tolerância ao estresse hídrico (Santos *et al.*, 2021).

Pesquisas apontam que há incrementos na produtividade da soja quando coinoculadas com *A. brasilense* e *Bradyrhizobium*, ou seja, há sinergismo de microrganismos que atuam em benefício para as plantas. Os processos microbianos do *Bradyrhizobium* spp. e do *A. brasilense* são distintos e complementares e os dois microrganismos, se compatíveis na rizosfera, podem ter a capacidade de atuarem em conjunto (Santos *et al.*, 2021), entretanto, dependendo da população no inoculante, condições do solo e modo de aplicação, pode haver efeito competição e até mesmo antagonismo na rizosfera.

Comparando áreas inoculadas com coinoculadas, a inoculação realizada anualmente, resultou em incremento médio na produtividade de grãos de soja de 3,7 sacas por hectare ou 8,4%, enquanto que com a coinoculação, o incremento foi de 7,1 sacas por hectare ou 16,1% (Hungria *et al.*, 2013). Foram observados incrementos quando o *Bradyrhizobium* spp. foi inoculado nas sementes e o *A. brasilense* aplicado no sulco de semeadura (Hungria *et al.*, 2013), quando ambos

foram aplicados nas sementes (Hungria *et al.*, 2015), esse efeito foi menos pronunciado (Hungria e Nogueira, 2019).

A diversificação temporal das plantas, tal como a rotação de culturas, favorece o incremento na produtividade e a sua estabilidade no decorrer do tempo, melhorando os serviços ecossistêmicos (Tiemann *et al.*, 2015; Tamburini *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2020), de modo a beneficiar a saúde do solo e reduzir pragas e doenças (Barbieri *et al.*, 2019) e, assim, incrementar a produtividade das plantas em rotação, pois pode haver o efeito direto da ciclagem de nutrientes da palhada, pelo residual das bactérias no solo ou da FBN das leguminosas para as gramíneas em rotação.

A biodiversidade de espécies de plantas que ocorre em sistemas de rotação, está relacionada com o incremento na produção de biomassa (Hector *et al.*, 1999; Hooper e Dukes 2004; Roscher *et al.*, 2005), e essa diversidade de plantas é capaz de reutilizar melhor os recursos que estão disponíveis no ambiente, em virtude das interações interespecíficas positivas (Loreau *et al.*, 2001; Hooper *et al.*, 2005).

Efeito residual da coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* em soja pode melhorar a fisiologia de gramíneas cultivadas em sucessão, tal como o milho, favorecendo o potencial produtivo, tolerância à estresses ambientais (Cândido *et al.*, 2020; Cândido *et al.*, 2022), crescimento inicial mais rápido da planta, aumento do sistema radicular e teor de clorofila, indicando que pode ocorrer efeitos semelhantes em capins (Pereira *et al.*, 2021). Ademais, a inoculação pode deixar residual de nitrogênio no solo, promovendo maior nutrição e crescimento do capim (Guimarães *et al.*, 2022) e melhorar a tolerância ao déficit hídrico, o que pode ser importante para gramíneas em condições adversas (de Naoe *et al.*, 2020; Cândido *et al.*, 2022).

2.3 BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS E A RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO SOLO

As bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCPs) são aliadas essenciais na agricultura, oferecendo uma alternativa sustentável aos defensivos agrícolas e fertilizantes. A capacidade de aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, por promover o crescimento das plantas e melhorar a resiliência em ambientes estressantes, as torna indispensáveis para favorecer a produtividade das culturas (Altaii *et al.*, 2025; Ansabaveva *et al.*, 2025; Nixon *et al.*, 2026).

Em grande parte, as funções do ecossistema solo são complexas de analisar

diretamente. Desse modo, são usualmente inferidas a partir de atributos mensuráveis, como os indicadores de qualidade, pois abrangem as características físico-químicas e biológicas do solo (Zornoza *et al.*, 2015; Muñoz-Rojas *et al.*, 2016).

Tradicionalmente, os atributos físico-químicos são os principais indicadores e os mais utilizados para analisar a qualidade do solo. O teor de Carbono Orgânico do solo (CO), teor de Nitrogênio total (NT), saturação por bases (V%) e pH, estão no grupo dos atributos químicos (Rabot *et al.*, 2018). Contudo, os atributos físicos do solo são importantes indicadores de sua qualidade e demonstram o papel fundamental da saúde e a produção sustentável da agricultura (Regelink *et al.*, 2015; Rabot *et al.*, 2018).

São incluídos nas propriedades físicas, os atributos estruturais, porosidade, textura, densidade, teor de água e temperatura no solo. Esses atributos são dependentes do histórico de formação do solo, porém, são passíveis de serem alteradas por agentes naturais ou atividades antrópicas (Yu *et al.*, 2019).

O solo possui ampla diversidade microbiológica que reflete na manutenção da saúde do ecossistema (Torsvik e Ovreas, 2002), tal como, a associação entre os microrganismos com a matéria orgânica (MO), partículas minerais ou com a rizosfera das plantas (Foster, 1988). Essa associação ocorre por meio da produção de exopolissacarídeos (EPS) realizadas pelos microrganismos, tal como, a *Bacillus* (Días-Cornejo *et al.*, 2023) que apresentam componentes de biofilme, que são compostos por cadeias de polímeros de proteínas e carboidratos, secretados por uma ampla variedade da BPCP (Nouha *et al.*, 2016; Parada-Pinilla *et al.*, 2021). Os EPS podem se unir às partículas do solo e formar micro e macroagregados, e atuar em conjunto com as hifas de fungos, incrementando a estabilidade dos agregados do solo (Grover *et al.*, 2011). Além disso, os EPS liberados no solo atuam como camadas protetoras dos agregados devido à formação de pontes de cátions, forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio e mecanismos de adsorção de ânions.

As BPCPs que produzem os EPS podem incrementar significativamente a agregação do solo e o volume de poros, que influencia benéficamente no acréscimo da taxa de infiltração da água, condutividade hidráulica e redução da salinidade. Consequentemente, ocorre o aumento na disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, proporcionando maior tolerância ao estresse hídrico em virtude da melhoria das condições estruturais do solo (Sandhya *et al.*, 2010; Upadhyay *et al.*, 2011).

Os sistemas radiculares mais vigorosos e desenvolvidos provenientes da inoculação com as BPCP, podem favorecer a absorção de água e nutrientes (Lin *et al.*, 2020). Além disso, algumas BPCP podem tornar os nutrientes disponíveis para as plantas por mecanismos de mineralização e solubilização, como dos fosfatos complexos, produção de sideróforos, fixação de nitrogênio (FBN) e dessa forma, favorecer a tolerância das plantas ao estresse hídrico. A disponibilização de fósforo no solo por meio de bactérias envolve diversos mecanismos, principalmente a liberação de ácidos orgânicos, como succinato, citrato, gluconato e acetato (Goldstein *et al.*, 2003), além disso, ocorre a liberação de cátions H^+ no sistema promovendo a redução do pH do solo (Villegas; Fortin, 2002).

2.4 INFLUÊNCIA DOS MICRORGANISMOS INOCULADOS SOBRE A BIOTA "NATIVA" DO SOLO

A rizosfera é a região do solo que é afetada diretamente pela ação das raízes (Compant, 2010), por estar localizada ao seu redor, e é um nicho altamente atrativo para as bactérias, em virtude da alta deposição de exsudatos radiculares com elevado teor de açúcar, vitaminas, aminoácidos e demais nutrientes, tornando-o propício para os microrganismos.

A região da rizosfera é densamente colonizada por diferentes microrganismos que competem por fatores de produção (espaço, nutrientes e água) (Ryan *et al.*, 2001), além disso, pode-se sugerir que em sistemas naturais, onde os microrganismos coevoluem de modo mais íntimo com os outros seres do ecossistema, sobrevivam os grupos mais adaptados em utilizar os recursos naturais, sendo então, reduzida a presença de grupos que vivem neste ambiente com base na competição. Em contrapartida, há os ambientes modificados (artificiais), que são compostos por áreas de agricultura e/ou pecuária, onde há predominância dos grupos competidores, e estes podem prevalecer, tal como a entrada de microrganismos invasores, exógenos à área, e que apresentam alta taxa de multiplicação, podendo se estabelecer na nova área por serem extremamente competitivos (Cardoso *et al.*, 2016).

A habilidade de uma estirpe de rizóbio sobreviver e colonizar um sítio de nodulação em detrimento de outro, define-se como competição (Lupwayi *et al.*, 2005), e é comum que algumas estirpes possam competir pelo mesmo sítio de

infecção na planta hospedeira. As estirpes nativas são ineficientes na competição contra os microrganismos provenientes do inoculante. Assim, os rizóbios nativos podem ser mais aptos ao ambiente, porém, por apresentarem alta competitividade, essas bactérias, em geral, são ineficientes simbioticamente. A presença destas populações no sistema, contribui insuficientemente para a FBN nas leguminosas, sendo imprescindível a inoculação com estirpes eficientes, adaptadas e competitivas às condições edáficas e climáticas da área (Cardoso *et al.*, 2016).

As BPCPs isoladas de plantas, são originalmente provenientes da raiz ou da rizosfera e, portanto, pertencentes a uma população microbiana. As populações microbianas são constituídas por alto número de indivíduos e com o objetivo de sobreviver, realizam relações com os demais membros dessas populações. Essas relações são estabelecidas de forma que as funções de cada membro sejam complementares para eventos como proteção e nutrição (He *et al.*, 2014; Hallam e Mccutcheon, 2015; Santhanam *et al.*, 2015). Entretanto, em algumas situações, as interações estabelecidas tornam-se um impedimento para o estabelecimento de um microrganismo exógeno por efeito antagônico e/ou de competição de estirpes exógenas colocadas na rizosfera (He *et al.*, 2014).

A introdução de uma BPCP em uma população da qual ela não faz parte, é considerada como invasora. Desse modo, para que haja estabelecimento nessa comunidade, a BPCP deve encontrar um nicho vazio ou deslocar um membro da população que lhe traga benefícios (Compant *et al.*, 2010). A eficiência da competição pelo nicho necessita que a bactéria tenha traços de invasor. A presença ou ausência de determinadas características é o que vai determinar a competência rizosférica à bactéria e proporcionar seu adequado estabelecimento (Barret *et al.*, 2011).

Além disso, pode-se inferir que o sucesso do estabelecimento de uma BPCP é a resiliência da população microbiana perturbada. As perturbações ocasionadas em populações microbianas ou a imposição de estresse alteram sua estrutura (Lourenço *et al.*, 2018; Timm *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2018). No entanto, no decorrer do tempo a população original pode voltar a se estabelecer novamente, caso não haja a inoculação adicional.

A inoculação de BPCPs nas plantas, ocorre por meio da aplicação do inóculo com alta concentração de células bacterianas (10^6 – 10^9 UFC (Unidades Formadoras de Colônia)) ou esporos mL⁻¹, podendo ser realizada repetidamente,

como é o caso da inoculação adicional e coinoculação (Freitas-Lório, 2016; Straub *et al.*, 2013b). Esse modelo de inoculação significa uma perturbação no sistema. Entretanto, há escassos relatos na literatura sobre os mecanismos que ocorrem entre a BPCP e a população nativa ou entre as bactérias coinoculadas. A inserção da BPCP pode promover alterações na população presente ou não alterar sua estrutura (Ardanov *et al.*, 2012; Cipriano *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2018 a).

2.5 PRÁTICA DE MANEJO CONSERVACIONISTA E A ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS

Embora não seja isento de adversidades, a agricultura de conservação (AC) é um sistema agrícola capaz de alcançar a intensificação do uso da terra para atender à demanda mundial de alimentos (Lal, 2015b).

A AC define-se como sistema que contém cultivo mínimo com cobertura do solo (ao menos 30% do solo coberto entre colheita e semeadura) e uso de espécies leguminosas na mesma área (FAO, 2021) para aumentar a FBN. Generalizando, a AC consiste em sistema projetado para aumentar a sustentabilidade da produção agrícola, proteger e conservar o solo, a água e os recursos biológicos para que sejam reduzidos os insumos externos (Page; Dang; Dalal, 2020).

Essa prática tem demonstrado diversos benefícios, compreendendo maior armazenamento de água no solo (Lampurlanés *et al.*, 2016; Page *et al.*, 2019), incremento na qualidade do solo (Jat *et al.*, 2019; Somasundaram *et al.*, 2019) e em algumas situações, pode promover maior produtividade e renda agrícola (Thierfelder; Matemba-Mutasa; Rusinamhodzi, 2015; Pradhan *et al.*, 2018; Page *et al.*, 2019).

A busca pelo aumento da produtividade de culturas de forma mais sustentável, tal como, a sucessão de soja/milho safrinha, prática comum no Brasil, pode promover a redução da qualidade do solo, além da incidência de pragas, doenças e plantas daninhas. Nesse contexto, o uso do sistema conservacionista de produção tem o objetivo de produzir de modo sustentável por meio do princípio da rotação de culturas (Aratani; Madalosso; Pompeu, 2018).

A rotação de culturas consiste na alternância ordenada, sazonal e cíclica de diversas espécies vegetais, em uma área específica e que exploram o solo de diversas maneiras, impactando positivamente no teor de MO, e em relação à sucessão de culturas, refere-se à repetição sazonal de uma sequência de duas ou

mais espécies em uma mesma área, por diversos anos (Mendonça *et al.*, 2015).

Com o objetivo de incrementar a palhada no solo, sem impactar na produtividade das culturas graníferas, o uso de espécies forrageiras principalmente do gênero *Urochloa* em consórcio com milho, vem sendo muito estudado e usado por pesquisadores e agricultores em esquemas de rotação (Mendonça *et al.*, 2015).

3 HIPÓTESES

- A interação entre os microrganismos afetará benéficamente na fertilidade, qualidade física e microbiológica do solo.
- As técnicas de inoculação adicional e coinoculação promovem melhor desenvolvimento e produção da soja e ciclagem de nutrientes no sistema.
- O efeito residual da inoculação, coinoculação e inoculação adicional de microrganismos das BPCPs na soja, incrementa a massa seca do capim em sucessão.
- A interação entre *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense* dependendo do modo de aplicação pode ser antagônica.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos de diferentes formas de aplicação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense* (ambos ou separados nas sementes, no sulco de semeadura, e com inoculação adicional de *Bradyrhizobium elkanii*) sobre:

- a produtividade de grãos, teor foliar de nutrientes, trocas gasosas da soja;
- a massa seca do capim em sucessão;
- a qualidade do solo (atributos físicos, químicos, microbiológicos e enzimáticos); e as possíveis interações antagônicas ou sinérgicas entre os microrganismos;
- Componentes de produção e produtividade do sorgo granífero.

4.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

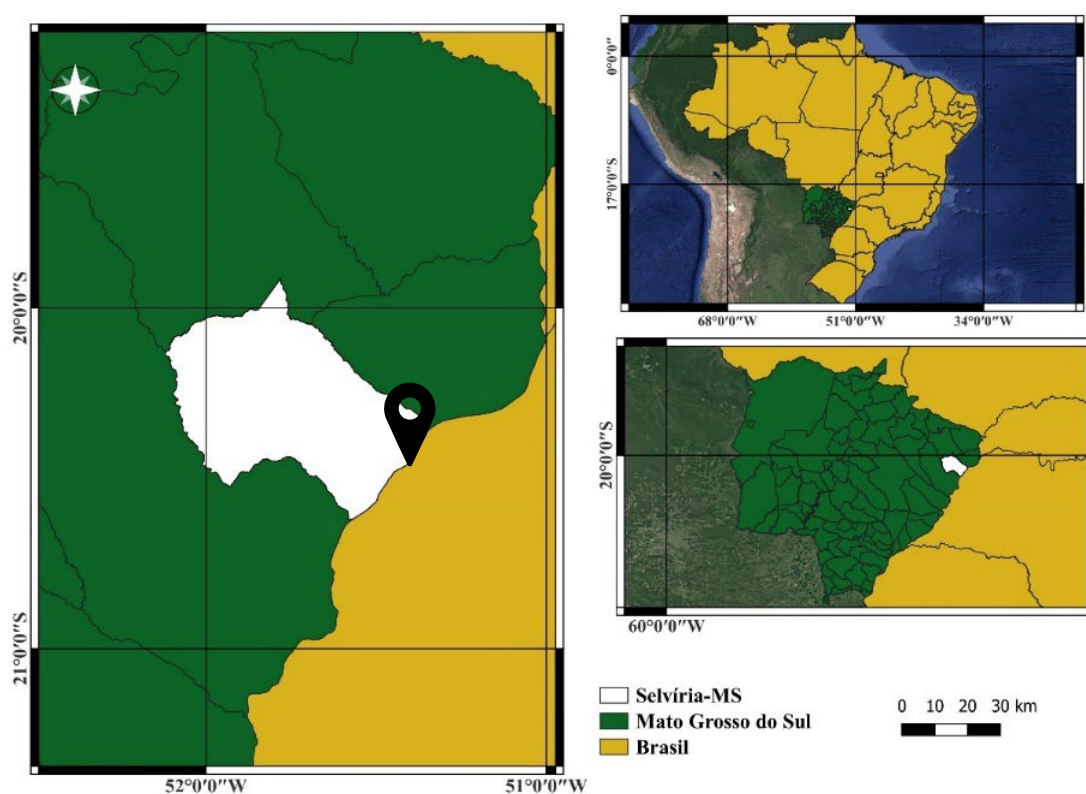
- ✓ Verificar as possíveis alterações das características físicas, químicas e microbiológicas do solo em função do incremento de matéria vegetal no sistema;
- ✓ Analisar se a presença dos microrganismos promove efeitos residual benéficos na produção de matéria seca da cultura em sucessão à safra da soja e posterior palhada e/ou grãos no sistema plantio direto.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

O experimento foi realizado em condições de campo e sequeiro, no município de Selvíria/MS, com altitude de 357 metros, na área experimental do Setor de Produção Vegetal da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão, pertencente à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira/SP (Figura 1), e conduzido nas safras dos anos de 2022/23, 2023/24 e 2024/25.

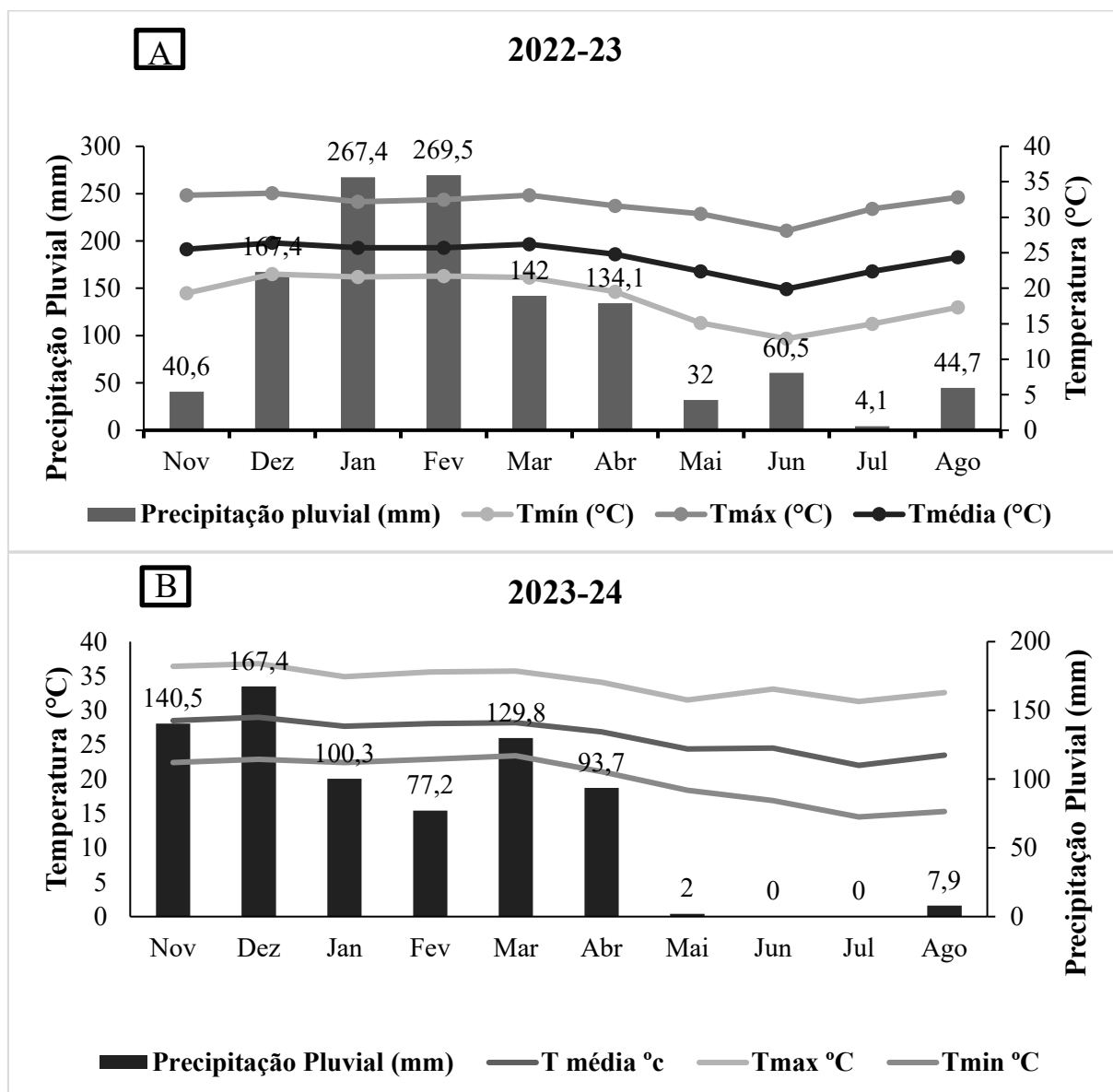
Figura 1 – Mapa da localização experimental.

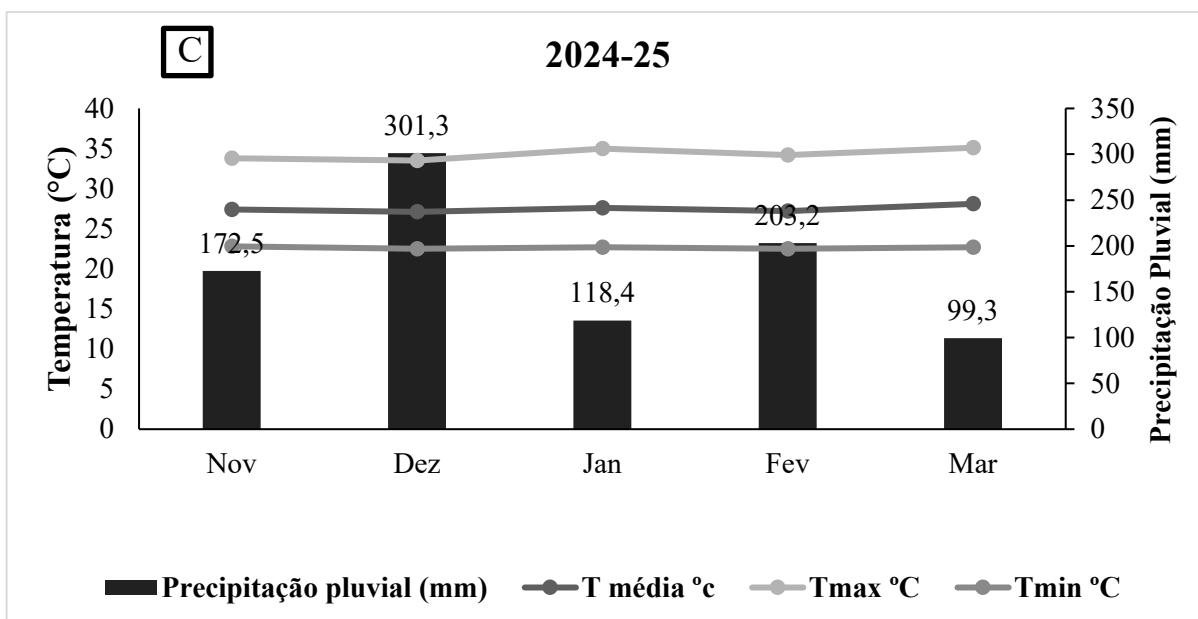


Fonte: produção da própria autora.

O tipo climático da região é o Aw segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (Alvares *et al.*, 2013). A precipitação média anual é de 1.140 mm e a temperatura média de 25 °C (UNESP, 2024). Nos anos agrícolas do estudo foram obtidos os dados médios de precipitação pluvial e temperatura (Figura 2A, 2B e 2C).

Figura 2 – A-C. Temperaturas mínima (Tmin) (°C), média (Tmédia) (°C) e máxima (Tmáx) (°C), registro da precipitação pluvial (mm) mensal durante o período experimental das safras de 2022 até 2025. Selvíria-MS, 2026.





Fonte: Estação meteorológica do laboratório de irrigação e drenagem localizado na FE/Unesp- Ilha Solteira-SP.

O relevo da área é caracterizado como moderadamente plano, e o solo está classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico de textura argilosa (Santos *et al.*, 2018), com 52% de teor de argila no horizonte A, e histórico de 14 anos em SPD. As plantas de cobertura utilizadas na sucessão da soja foram a *Urochloa brizantha* cv. Piatã na safra de 2023 e *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás na safra de 2024, ambas consorciadas com sorgo granífero.

5.2 HISTÓRICO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A área experimental possui histórico de cultivo constituído por culturas anuais e anteriormente à condução da atual pesquisa houve uma sequência de cultivos. Foram nos últimos 10 anos agrícolas: Milho + *Urochloa* spp. + Guandu-anão (Safr 2014/15) e Feijão de inverno (Safr 2015); Milho + *Urochloa* spp. + Guandu-anão (Safr 2015/16) e Feijão de inverno (Safr 2016); Soja (Safr 2016/17) e Sorgo + *Urochloa* spp. + Guandu Anão (Safr 2017); Soja (Safr 2017/18) e Sorgo + *Urochloa* spp. (Safr 2018); Soja (Safr 2018/19) e Aveia preta (Safr 2019); Soja (Safr 2019/20) e Aveia preta (Safr 2020), Sorgo granífero (Safr 2021), em área de sequeiro. Em abril de 2021 foi necessária a aplicação de calcário, na dose de 2,3 t ha⁻¹ (PRNT de 87%) aplicada a lanço e sem incorporação, para elevar a saturação por bases a 70%.

Antes da instalação do experimento (soja de 2022/23) foram coletadas amostras de

solo, nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m para determinação dos atributos químicos, de acordo com Raij *et al.* (2001) e físicas (Teixeira *et al.*, 2017) (Tabelas 1 e 2). Na camada de 0 a 0,10 m foram avaliadas a atividade respiratória microbiana (ARM) (Alef, 1995) e carbono da biomassa microbiana (CBM) do solo (Vance *et al.*, 1987), com coleta no esquema entrelinha-linha-entrelinha, ou seja, as mesmas coletadas para análise da fertilidade do solo.

Também avaliadas, na camada de 0,00 a 0,10 m, as atividades de enzimas do solo associadas ao ciclo do carbono (β -glucosidase) (Tabatabai, 1969), do fósforo (fosfatase ácida) (Tabatabai, 1969) e do enxofre (arilsulfatase) (Spencer, 1958) (Tabela 3). Sendo a análise da atividade respiratória microbiana (ARM), avaliada pela produção da somatória diária de CO₂ por 7 dias de incubação.

Tabela 1 – Caracterização inicial dos atributos químicos do solo. Selvíria-MS 2022.

Prof.	pH	P resina	S-SO ₄	MO	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	m
--m--	Ca Cl ²		mg dm ⁻³	g dm ⁻³								%	
0,00,00-0,10	6,3	65	11	37	3,8	81	34	16	0	118,8	134,8	88	0
0,10-0,20	5,8	53	10	21	1,9	34	23	25	0	58,9	83,9	70	0
0,20-0,40	5,4	47	12	17	1,2	24	22	28	0	47,2	75,2	63	0

Fonte: produção do próprio autor.

Nota: Prof.: profundidade do solo; pH: concentração de íons de hidrogênio; P resina: fósforo; S-SO₄: enxofre; MO: matéria orgânica; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; Al: alumínio; SB: soma das bases; CTC: capacidade de troca catiônica; V%: saturação de bases; m%: saturação de alumínio.

Tabela 2. Caracterização inicial dos atributos físicos do solo. Selvíria-MS, 2022.

Prof.	Macroporos	Microporos	Poros Total	Densidade
--m--		-----%-----		kg dm ⁻³
0,00,00-0,10	6,4	40,8	47,2	1,6
0,10-0,20	6,5	36,3	42,8	1,6
0,20-0,40	7,1	41,5	48,5	1,5

Fonte: produção da própria autora.

Tabela 3 – Caracterização inicial dos atributos enzimáticos e biológicos do solo, antes da instalação experimental, nas profundidades de 0,00 a 0,10 m. Selvíria, MS, 2022.

Arilsulfatase	B-Glicosidase	Fosfatase Ácida	CBM	ARM
----- mg PNF kg ⁻¹ solo/h ----			mg C g ⁻¹	mg g ⁻¹ de solo seco
50,63	86,77	190,11	0,43	0,55

Fonte: produção da própria autora.

Nota: CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; ARM: Atividade Respiratória Microbiana; mg PNF kg⁻¹ solo/h: quantidade de miligramas de PNG (substrato *p*-nitrofenil-β-D-glicopiranosídeo) processada por quilograma de solo seco.

5.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na mesma área por todos os ciclos produtivos, em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 4 x 2. O primeiro fator correspondeu às estratégias de inoculação na semeadura:

- 1) Controle (sem inoculação),
- 2) inoculação de *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes;
- 3) coinoculação com *B. elkanii* nas sementes e *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura;
- 4) coinoculação de *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes.

O segundo fator correspondeu à presença de inoculação adicional de *B. elkanii* por pulverização no solo, nas entrelinhas da cultura, no estágio R1 (início do florescimento).

Para a soja, cada parcela foi composta por 14 linhas de 12 m de comprimento, espaçadas 0,50 m entre linhas e entre parcelas. Para o capim Piatã foi utilizada a densidade de 7 kg de sementes puras viáveis em espaçamento de 0,34 m entrelinhas, em ambas as safras. Cada parcela apresentou 8 m de largura e 10 m de comprimento, somando área de 80 m².

O experimento constou da rotação capim Piatã e Paiaguás (outono/inverno de 2023 e 2024) semeados em consórcio com sorgo granífero, e soja na sucessão (primavera/verão de 2022/23, 2023/24 e 2024/25) (Figura 3).

Figura 3 – Esquema da linha do tempo experimental.



Fonte: produção da própria autora.

As sementes de soja foram tratadas conforme o padrão comercial com inseticidas e fungicidas, e seguindo a recomendação dos fabricantes. Os inoculantes bacterianos, via sementes, foram aplicados à sombra, momentos antes da semeadura, para evitar quedas na sobrevivência dos microrganismos no produto. Enquanto que a inoculação adicional foi efetuada com pulverização (pulverizador costal) com *Bradyrhizobium elkanii* no solo das entrelinhas da soja em estágio R1.

Quanto aos inoculantes líquidos, foram utilizadas as estirpes de *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e Ab-V6 (3×10^8 UFC/mL) da empresa BIOMAX Azum e *Bradyrhizobium elkanii* SEMIA 587 e SEMIA 5019 (7×10^9 UFC/mL) da empresa BIOMAX premium. A dose do inoculante *Bradyrhizobium* foi 200 mL para cada 20 kg de sementes e 400 mL em 200 L de água ha⁻¹ para a calda de pulverização costal (inoculação adicional do solo nas entrelinhas da soja), enquanto que a dose do *Azospirillum* foi de 200 mL para cada 20 kg de sementes.

5.4 SAFRA DA SOJA

5.4.1 Semeadura e condução

A primeira semeadura da safra da soja ocorreu no dia 08/11/2022, com a cultivar 97R50IPRO da empresa Pioneer® contendo o sistema de tratamento Inseticida Dermacor® (625 g L⁻¹ ingrediente ativo (i.a.)) e fungicida Rancona® (360 g L⁻¹ i.a.),

com espaçamento entre linhas 0,50 m, atingindo-se densidade de 13,6 sementes por metro e na profundidade de aproximadamente 0,05 m.

A semeadura da segunda safra foi no dia 16/11/2023, com a cultivar 80HO109IPRO “Mamoré” da empresa Seedcorp®, com espaçamento entre linhas 0,50 m, atingindo-se densidade de 14,5 de sementes por metro e na profundidade de aproximadamente 0,05 m.

Na terceira safra, a soja foi semeada em 12/11/2024, com a cultivar HO MaracailPRO, com a tecnologia intacta RR2 PRO da empresa Seedcorp HO®, com espaçamento entre linhas 0,50 m, atingindo-se densidade de 14,7 sementes por metro e na profundidade de aproximadamente 0,05 m. Todas as semeaduras foram realizadas por meio de semeadora-adubadora com mecanismo sulcador tipo haste (facão) para plantio direto Tatu Marchesan PST Plus 4045.

As adubações de semeadura foram realizadas de acordo com a análise do solo, utilizando 300 kg ha⁻¹ de 08-28-16 (N; P₂O₅; K₂O), de acordo com as recomendações de Quaggio *et al.*, (2022) e não houve adubação de cobertura nas safras de 2022/23 e 2023/24, porém na safra de 2024/25 foram aplicados 100 kg ha⁻¹ KCl, de acordo com Quaggio *et al.*, (2022).

A inoculação adicional da primeira, segunda e terceira safras, ocorreram nos dias 21/12/2022, 08/01/2024 e 26/12/2024, respectivamente, com pulverização (pulverizador costal) com *Bradyrhizobium* no solo das entrelinhas da soja em estádio R1, no período da manhã. As precipitações ocorreram nos dias: 23/12/2023 com 57 mm, 10/01/2024 com 19 mm e 26/12/2024 com 21 mm de precipitação.

Os tratos fitossanitários foram realizados de acordo com as necessidades da cultura. As colheitas da soja foram realizadas em 22/03/2023, 11/03/2024 e 12/03/2025.

5.4.2 Avaliação nutricional foliar da soja

O material vegetal (folhas) foi coletado ao acaso, de 15-20 plantas por parcela, com pecíolo + folha, no período de R1, do terceiro trifólio completamente desenvolvido e acondicionada em sacos de papel devidamente etiquetados, e seco em estufa de circulação forçada de ar a 60 ± 5 °C por 72 h. O material foi então moído em moinho de facas Wiley de aço inoxidável, passando por uma peneira de 10 malhas e então colocado em recipientes plásticos etiquetados. Cada amostra foi pesada (0,100 g), digerida com ácido sulfúrico (digestão sulfúrica) para quantificar o nitrogênio, e a

digestão nitro perclórica para quantificar P, K, Ca, Mg e S, foi realizada por meio da pesagem do material vegetal moído (0,250 g), digerido e posteriormente determinado conforme Malavolta *et al.* (1997) e Silva, (2009).

5.4.3 Número total e massa fresca e seca de nódulos por planta

Por ocasião do estágio R₃ (início da formação das vagens), nas datas 06/01/2023, 23/01/2024 e 15/01/2025, foram coletadas 3 plantas em cada parcela, separando-se a parte aérea do sistema radicular para avaliação dos nódulos radiculares. Os nódulos foram contabilizados e após pesagem para determinação da massa fresca por planta, foram colocados em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 h para determinação da massa seca.

5.4.4 Trocas gasosas, índice de clorofila a e b, e total

No estágio fenológico R₃ da soja, nas duas últimas safras (27/01/24 e 14/01/25), na terceira folha recém expandida da haste principal da soja, foram avaliadas 3 plantas em cada parcela, foram avaliadas as trocas gasosas pela manhã, entre 8 e 11 h, com aparelho Portable Photosynthesis System (CIRAS 3, PP Systems, Massachusetts, USA) e com radiação média (PARE) = 1822 e temperatura média de 25 °C. As folhas foram posicionadas dentro da câmara foliar universal PLC3, que possui dimensões de 18 × 25 mm. As condições controladas incluíram concentração padrão de CO₂ de 390 µmol/mol e umidade fixa de 60%.

O fluxo de ar na câmara foi mantido constante em 300 mL/min, enquanto no analisador foi ajustado para 100 mL/min. A iluminação foi feita com luz ambiente e um sensor infravermelho (IV) foi empregado para medir a temperatura foliar. A área foliar considerada foi de 4,50 cm² e a resistência da camada limite foi calculada em 0,40 m²/s/mol. A taxa estomática foi fixada em 50%, garantindo trocas gasosas adequadas. O aparelho utilizado foi calibrado automaticamente, seguindo os procedimentos descritos por Bomfim *et al.* (2023) e Zhang *et al.* (2018).

Os dados obtidos pelo equipamento foram processados usando as fórmulas de Parkinson *et al.* (1980), que abrangem vários parâmetros, incluindo a taxa fotossintética (A, em µmol CO₂ m⁻² s⁻¹), condutância estomática (Gs, em mol H₂O m⁻² s⁻¹), transpiração (E, em mmol H₂O m²/s) e concentração interna de CO₂ (Ci, em µmol mol⁻¹) e a Eficiência do uso da água (WUE, em µmol CO₂ mmol H₂O⁻¹) (Marshall *et*

al., 1980).

O teor de clorofila foi realizado no mesmo momento da avaliação das trocas gasosas, para estimar o teor de clorofila de forma indireta, foi utilizado o clorofilômetro com medidor digital de teor de clorofila portátil (Clorofilog) para verificação do índice das clorofilas a, b e total (Falker, 2008). As avaliações foram feitas no estágio R3 da soja, em três folhas totalmente desenvolvidas, sem danos, em cada parcela, e escolhidas ao acaso.

5.4.5. Avaliações morfológicas e produtivas da soja

Foram realizadas as avaliações morfológicas, dos componentes da produção e produtividade de grãos da soja no estágio R8 (maturidade plena), sendo essas: População de Plantas (POP), obtido pela contagem do número de plantas na área útil de cada parcela (3 linhas centrais de 3 metros, totalizando 9 m) e posteriormente convertido no total de plantas por hectare; e a Produtividade de Grãos de Soja (PG), as plantas da área útil das parcelas foram colhidas manualmente, trilhadas e os grãos pesados para determinação da produtividade por parcela, posteriormente foi extrapolada para PG (kg ha^{-1}). corrigindo-se a umidade para 13% (base úmida).

Em dez plantas da área útil por parcela, foram determinadas: Altura de Plantas (ALT), avaliando a distância média compreendida da superfície do solo até a extremidade superior da soja, utilizando-se uma fita graduada; Altura da Inserção da Primeira Vagem (ALT1VG), pela distância média compreendida da superfície do solo até a inserção da primeira vagem, utilizando-se uma fita graduada; Número de Vagens por Planta (NVP), por contagem do total de vagens nas 10 plantas e posteriormente calculada a média por planta; Número de Grãos por Planta (NGP), pela contagem do número de grãos totais das 10 plantas e posteriormente calculada a média por planta; e a Massa de 100 Grãos (M100), obtida pela contagem de cem grãos por parcela em contador eletrônico, determinando a massa de 100 grãos em balança eletrônica de precisão (0,01 g), corrigindo a umidade para 13% (base úmida).

5.5 SAFRA DO SORGO E CAPIM

5.5.1 Semeadura, condução e avaliações do sorgo e capim

A primeira safra do consórcio de sorgo híbrido granífero (cultivar 84G05) com *Urochloa brizantha* (BRS Piatã) ocorreu no dia 03/05/2023, e a segunda safra do consórcio do sorgo híbrido granífero (cultivar 84G05) com *Urochloa brizantha* cv. Paiaguás foi no dia 23/04/2024, por meio de semeadora-adubadora para plantio direto Tatu Marchesan PST Plus 4045.

A profundidade de semeadura do sorgo foi de aproximadamente 0,03 m e o espaçamento entrelinhas foi de 0,45 m, com densidade de sementes de aproximadamente 7,9 sementes m⁻¹.

A semeadura do sorgo ocorreu simultaneamente com a semeadura dos capins, em ambos os anos, na profundidade de aproximadamente 0,05 m, em espaçamento entrelinhas de 0,34 m e gasto de aproximadamente 6,0 kg de sementes por hectare, Valor Cultural de 60%, com a semeadura realizada de forma mecânica, com uso de uma semeadora-adubadora com mecanismo sulcador tipo haste (facão) para SPD e com adubação de cobertura nos dias 02/06/2023 e 21/05/2024 com 300 kg ha⁻¹ do formulado 20-00-20 em ambos os anos, quando o sorgo estava no estágio fenológico V5.

As colheitas do sorgo ocorreram no dia 22/08/2023 e 07/08/2024, na primeira e segunda safras, respectivamente, e posteriormente foram realizadas as avaliações morfológicas e de produtividade das culturas, sendo para a cultura do sorgo: População de Plantas (POP), obtido pela contagem do número de plantas na área útil de cada parcela (3 linhas centrais de 3 metros, totalizando 9 m) e posteriormente convertido no total de plantas por hectare; e a Produtividade de Grãos de Sorgo (PG), as plantas da área útil das parcelas foram colhidas manualmente, trilhadas e os grãos pesados para determinação da produtividade por parcela, posteriormente foi extrapolada para PG (kg ha⁻¹) corrigindo-se a umidade para 13% (base úmida).

Em dez plantas da área útil por parcela, foram determinadas: Altura de Plantas (ALT), avaliando a distância média compreendida da superfície do solo até a extremidade superior do sorgo, utilizando-se uma fita graduada; Comprimento de Panícula (CP), obtido pelo comprimento médio das panículas, mensurados utilizando-se uma fita graduada; Diâmetro Basal do Colmo (DC), por medição do terço basal do colmo da planta, utilizando-se paquímetro graduado em milímetros e posteriormente

calculado o diâmetro médio; Massa de 1000 Grãos (M1000), obtida pela contagem de mil grãos por parcela em contador eletrônico, determinando a massa de 1000 grãos em balança eletrônica de precisão (0,01 g), corrigindo a umidade para 13% (base úmida); Produtividade de Matéria Verde (MV) e Matéria Seca (MS) de Folhas, Colmo e Panículas separadamente, das dez plantas da área útil, que foram separadas manualmente em folhas, colmo e panículas, posteriormente, o material vegetal foi pesado para obtenção da MV, passados para sacos de papel e levados à estufa de circulação forçada à 65°C por 72 horas, para a obtenção da MS, cujos valores foram extrapolados para produção por hectare.

Em ambas as safras, após as colheitas do sorgo, a área permaneceu com o capim Piatã e Paiaguás (safra 2023 e 2024, respectivamente), sendo que nos dias 06/11/23 e 24/10/2024, foram realizadas a determinação da produtividade de matéria seca. Para tanto, com o auxílio de um quadro amostral de 1,0 x 1,0 m, foram coletadas as plantas dentro de 1 m² de cada parcela, acima do nível do solo, as quais foram acondicionadas em sacos de papel devidamente identificados e pesados em balança de precisão para a determinação da massa fresca (MV). Novamente, após esse procedimento, foram separadas subamostras, passadas para sacos de papel e levadas à estufa de circulação forçada à 65 °C por 72 horas, para a obtenção da massa seca (MS) e posteriormente extrapolados os valores para produção por hectare.

Após essas avaliações, os capins Piatã e Paiaguás foram dessecados, com a utilização do herbicida Glyphosate (1560 g ha⁻¹ do i. a.), para seguir com o cultivo seguinte (soja em sucessão) da rotação em SPD.

5.5.2 Avaliação nutricional dos capins

O material vegetal dos capins foi colocado em sacos de papel devidamente etiquetados e seco em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 72 h. O material foi então moído em moinho de facas Wiley de aço inoxidável passando por peneira de 10 mesh e então colocado em recipientes plásticos etiquetados. Cada amostra foi pesada (0,100 g), digerida com ácido sulfúrico para quantificar o nitrogênio, e a digestão nitro perclórica para quantificar P, K, Ca, Mg e S, foi por meio da pesagem do material vegetal já moído (0,250 g), segundo metodologia de Silva (2009) e Malavolta *et al.* (1997), e posterior cálculo do acúmulo de nutrientes na palhada depositada sobre o solo, visando avaliar o potencial de reciclagem de nutrientes e da

FBN no solo, por efeito dos tratamentos.

5.6 ANÁLISES DO SOLO

5.6.1 Fertilidade do solo

Ao final da colheita da soja de 2022/2023 e 2024/2025, foram efetuadas coletas de amostras de solo deformadas em 10 pontos por parcela para compor uma amostra composta, nas camadas de 0,00 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, onde foram realizadas análises de Matéria Orgânica, pH, Capacidade de Troca Catiônica, Soma de Bases, Cálcio, Magnésio, Enxofre, Alumínio, Acidez Potencial, Saturação por alumínio, Saturação por bases, Fósforo, Potássio, segundo metodologia descrita por Raij *et al.* (2001).

5.6.2 Física do solo

No final da safra da soja (2025) e nas mesmas camadas para caracterização química do solo, foram coletados anéis volumétricos (dois por parcela) para quantificação da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total, seguindo a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

5.6.3 Fracionamento físico da matéria orgânica

Nas amostras deformadas de solo de 2023 e 2025, também foram efetuados os fracionamentos físicos da matéria orgânica do solo, por meio de 20 g de terra fina seca ao ar (TFSA) e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), os quais foram agitados durante 16 h em agitador horizontal (Cambardella e Elliot, 1992). Em seguida, a suspensão foi passada em peneira de 53 micras, obtendo-se o carbono da matéria orgânica associada aos minerais (COM) das frações silte e argila, sendo este obtido por diferença entre Carbono Orgânico Total (COT) e Carbono Orgânico Particulado (COP) (Yeomans e Bremner, 1988).

5.6.4 Análises biológicas e enzimáticas

Para determinar a atividade respiratória microbiana (ARM) (Alef, 1995) e, carbono da biomassa microbiana (CBM) do solo (Vance *et al.*, 1987), foram utilizadas

as amostras coletadas à 0,00-0,10 m, com coleta no esquema entrelinha-linha-entrelinha, ou seja, as mesmas coletadas para análise da fertilidade do solo, ao final das safras da soja de 2022/23 e 2024/2025. Nelas também foram avaliadas as atividades de enzimas do solo associadas ao ciclo do carbono (β -glucosidase) (Tabatabai, 1969), do fósforo (fosfatase ácida) (Tabatabai, 1969) e do enxofre (arilsulfatase) (Spencer, 1958).

5.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Após tabulação dos resultados, foram efetuadas as análises em ambiente de computação estatística e gráfica do Software R da versão R x 64.4.1.0 (R Core Team, 2021) cujos dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homocedasticidade de Levene, ambos a 5% de significância ($p \geq 0.05$). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0.05$), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p \leq 0.05$). A análise de correlação de Pearson ($p \leq 0.05$) também foi realizada para identificar variáveis dependentes que são diretamente correlacionadas para avaliar a associação linear entre as variáveis quantitativas mensuradas no experimento. O pacote “corrplot” foi utilizado para criar o Heatmap, com funções “cor” e “cor.mtest” para criar os coeficientes e matrizes de p-valores. As comparações anuais entre as safras, foi realizada de acordo com a média geral de todos os tratamentos para cada ano agrícola. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença estatística significativa entre as safras pelo teste de comparação de médias ($p < 0,05$).

REFERÊNCIAS

- ALEF, K. Soil respiration. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London: Academic Press, p. 214-219, 1995.
- ALTAI, H. A.; MOHAMMED, S. J.; HUSSAIN, W. S. Application of Plant Growth-Promoting Bacteria PGPB in Propagation Stages Towards a More Sustainable Agricultural System. **Plant Propagation Techniques and Impacts on Sustainable Agriculture**, p. 267-288, 2025. DOI: 10.4018/979-8-3373-5626-6.ch011
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, p. 711–728, 2013.
- ANSABAYEVA, A.; MAKHAMBETOV, M.; REBOUH, N. Y.; ABDELKADER, M.; SAUDY, H.; S.; HASSAN, K. M.; NASSER, M. A.; ALI, M. A. A.; EBRAHIM, M. Plant Growth-Promoting Microbes for Resilient Farming Systems: Mitigating Environmental Stressors and Boosting Crops Productivity—A Review. **Horticulturae**, v. 11, n. 3, 2025. DOI:10.3390/horticulturae11030260
- ARATANI, R. G.; MADALOSSO, G.; POMPEU, A. T. Percepção e prática do sistema plantio direto por agricultores mato-grossenses. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 16, n. 1, p. 7–13, 2018.
- ARDANOV, P.; SESSITSCH, A.; HÄGGMAN, H.; KOZYROVSKA, N.; PIRTTILÄ, A. M. Methylobacterium-Induced Endophyte Community Changes Correspond with Protection of Plants against Patogen Attack. **Plos One**, v. 7, p. 1-8, 2012.
- ASHWORTH, A.J.; OWENS, P.R.; ALLEN, F.L. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, 2020. Article 114062, DOI:10.1016/j.geoderma.2019.114062
- BANA, R.S.; CHOUDHARY, A.K.; NIRMAL, R.C.; KURI, B.R.; SANGWAN, S.; GODARA, S.; BANSAL, R.; SINGH, D.; RANA, D.S. High-value crops' embedded groundnut-based production systems vis-à-vis system-mode integrated nutrient management: long-term impacts on system productivity, system profitability, and soil biofertility indicators in semi-arid climate. **Environmental Science**, v. 14, 2023. Article 1298946, DOI:10.3389/fpls.2023.1298946
- BANA, R.S.; FAIZ, M.A.; SANGWAN, S.; CHOUDHARY, A.K.; BAMBORIYA, S.D.; GODARA, S.; NIRMAL, R.C. Triple-zero tillage and system intensification lead to enhanced productivity, micronutrient biofortification and moisture-stress tolerance ability in chickpea in a pearl millet-chickpea cropping system of semi-arid climate. **Scientific Reports**, v.13, 2023. Article 10226, DOI:10.1038/s41598-023-36044-0
- BARBIERI, P.; PELLERIN, S.; SEUFERT, V.; NESME, T. Changes in crop rotations would impact food production in an organically farmed world. **Nat. Sustain.**, n. 2, p. 378-385, 2019.

BARRET, M.; MORRISSEY, J. P.; O'GARA, F. Functional genomics analysis of plant growth-promoting rhizobacterial traits involved in rhizosphere competence. **Biology and Fertility of Soils**, v. 47, p. 729–743, 2011.

BASHAN, Y.; HOLGUIN, G.; LUZ, E. Azospirillum-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**, v. 50, n. 8, p. 521-577, 2004.

BAVEYE, P.C.; SHNEE, L.S.; BOIVIN, P.; LABA, M.; RADULOVICH, R. Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020. DOI: 10.3389/fenvs.2020.579904

BODDEY, R.M.; CASAGRANDE, D.R.; HOMEM, B.G.C.; ALVES, B.J.R. Forage legumes in grass pastures in tropical Brazil and likely impacts on greenhouse gas emissions: a review. **Grass Forage Sci**, v. 75, p. 357-371, 2020. DOI: 10.1111/gfs.12498.

BOMFIM, N.C.P.; AGUILAR, J.V.; FERREIRA, T.C.; DOS SANTOS, B.S.; DE PAIVA, W.D.S.; DE SOUZA, L.A.; CAMARGOS, L.S. Root Development in *Leucaena Leucocephala* (Lam.) de Wit Enhances Copper Accumulation. **Environ. Sci. Pollut. Res**, n.30, p. 80245–80260, 2023. DOI:10.1007/s11356-023-28152-1

BOURSCHEIDT, M.L.B.; CARNEIROPEDREIRA, B.; PEREIRA, D.H.; ZANETTE, M.C.; V.E.N. S., J. Nitrogen input strategies in pastures: mineral fertilizer, bacterial inoculant and consortium with forage peanuts. **Sci. Electron. Arch.**, v. 12, p. 137, 2019. DOI: 10.36560/1232019784

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Society of America Journal**, v. 56, p. 777-783, 1992.

CÂNDIDO, A. C. T. F.; DE CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; FELITO, R. A. DA ROCHA, A. M. Effects of wastes from co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybeans and nitrogen fertilization on corn leaves by macronutrients. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 2, 2022. DOI: 10.17765/2176-9168.2022v15n2e8651

CÂNDIDO, A. C. T. F.; DE CARVALHO, M. A. C.; YAMASHITA, O. M.; FELITO, R. A. DA ROCHA, A. M. Nitrogen rates and residual effect of co-inoculation of soybean on maize plants. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 3, p. 633-643, 2020. DOI: 10.1590/1983-21252020v33n306rc

CARDOSO, E. J.B.N.; ANDREOTTE, F. D. Microbiologia do solo. 2º ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. P. 221. ISBN: 978-85-86481-56-7.

CASSINI, S.T.A.; FRANCO, M.C. Fixação biológica de nitrogênio: microbiologia, fatores ambientais e genéticos. In: VIEIRA, C.; PAULA JUNIOR, T.J.; BORÉM, A. (Eds). Feijão: 2 ed. Viçosa: UFV, 2006, p.143-159.

CHIRIACÒ, M.V.; PERUGINI, L.; BELLOTTA, M.; KAUGURE, L.; BERNOUX, M. Koronivia joint Work on Agriculture: Analysis of Submissions on Topics 2 (e) and 2 (f). **Food & Agriculture Org**, p. 40, 2021.

CHOUDHARY, A.K.; SOOD, P.; RAHI, S.; ADAV, D.S.; THAKUR, O.C.; SIRANTA, K.R.; DASS, A.; SINGH, Y.V.; KUMAR, A.; VIJAYAKUMAR, S.; BHUPENCHANDRA, I.; DUA, V.K.; SHIVADHAR, R.S.; BANA, R.S.; POONIYA, V.; SEPA, S.; KUMAR, S.; RAJAWAT, M.V.S.; RAJANNA, G.A.; HARISH, M.N.; VARATHARAJAN, G.A.; KUMAR, A.; TYAGI, V. Rice productivity, Zn-biofortification and nutrient-use efficiency as influenced by Zn-fertilization under conventional transplanted-rice and the system of rice intensification. **Frontiers in Environmental Science**, v.10, 2022. Article 869194, DOI:10.3389/fenvs.2022.869194

CIPRIANO, M. A. P.; LUPATINI, M.; LOPES-SANTOS, L.; DA SILVA, M. J.; ROESCH, L. F. W.; DESTÉFANO, S. A. L.; FREITAS, S. S.; KURAMAE, E. E. Lettuce and rhizosphere microbiome responses to growth promoting *Pseudomonas* species under field conditions. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 92, p. 1–13, 2016.

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

CRUSCIOL, C.A.C.; MATEUS, G.P.; MOMESSO, L.; PARIZ, C.M.; CASTILHOS, A.M.; CALONEGO, J.C.; BORGHI, E.; COSTA, C.; FRANZLUEBBERS, A.J.; CANTARELLA, H. Nitrogen-fertilized systems of maize intercropped with tropical grasses for enhanced yields and estimated land use and meat production. **Sustainable Food System**, v. 4, 2020. Article 544853, DOI: 10.3389/fsufs.2020.544853

CRUSCIOL, C.A.C.; MOMESSO, L.; PORTUGAL, J.R.; COSTA, C.H.M.; BOSSOLANI, J.W.; COSTA, N.R.; PARIZ, C.M.; CASTILHOS, A.M. RODRIGUES, V.A.; COSTA, C.; FRANZLUEBBERS, A.J.; CANTARELLA, H. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, 2021. Article 114062, DOI:10.1016/j.fcr.2020.108008

DARYANTO, S.; JACINTHE, P.A.; FU, B.; ZHAO, W.; WANG, W. Valuing the ecosystem services of cover crops: barriers and pathways forward. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 270–271, p. 76-78, 2019. DOI: 10.1016/j.agee.2018.10.021

DE NAOE, ALESSANDRA M.; PELUZIO, J.; CAMPOS, L. J. M.; NAOE, L. K.; SILVA, R. A.; Co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars subjected to water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 89-94, 2020. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n2p89-9

DHIMAN, V.K.; RANA, N.; DHIMAN, V.K.; PANDEY, H.; VERMA, P.; SINGH, D. Effect of rhizobial isolates and nitrogen fertilizers on nursery performance, nodulation behavior and nitrogen activity *Dalbergia sissoo* Roxb. seedlings. **Plant Stress**, v. 4, 2022. DOI:10.1016/j.stress.2022.100080

DÍAS-CORNEJO, S.; OTERO, MC.; BANERJEE, A.; GORDILLO-FUENZALIDA, F. BIOLOGICAL PROPERTIES OF exopolysaccharides produced by *Bacillus* spp. **Microbiological Research**, v. 268, n. 127276, 2023. DOI: 10.1016/j.micres.2022.127276

FAGUNDES, F. L. Influência da adubação nitrogenada na nodulação e produtividade da cultura da soja. Monografia. 35 pg. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Cachoeira do Sul, RS. 2019.

FALKER Automação Agrícola Ltda. Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG / CFL 1030). Porto Alegre: Falker, 2008. 33p.

FAO alerta sobre degradação de um terço dos solos do planeta. 2021. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/12/1773222>.

FOSTER, R. C. Microenvironments of soil microorganisms. **Biology and Fertility of Soils**, v. 6, p. 189-203, 1988. DOI:10.1007/BF00260816.

FRANCHI, L. Bradyrhizobium e *Azospirillum*: o que são, sinergia e importância. Agroinovadores. 2020. Disponível em: <https://agro.genica.com.br/2020/07/20/bradyrhizobium-e-azospirillum/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

FREITAS-IÓRIO, R. F. Interação de bactérias endofíticas e cana-de-açúcar: Efeitos na planta e nas comunidades microbianas rizosférica e endofítica. 2016. 96f. Tese. Gestão de Recursos Ambientais, Instituto Agronômico de Campinas.

GOLDSTEIN, A.; LESTER, T.; BROWN, J. Research on the metabolic engineering of the direct oxidation pathway for extraction of phosphate from ore has generated preliminary evidence for PQQ biosynthesis in *Escherichia coli* as well as a possible role for the highly conserved region of quinoprotein dehydrogenases. **Biochimica and Biophysica Acta**, v. 1647, n. 1/2, p. 266-271, 2003. DOI:10.1016/s1570-9639(03)00067-0.

GROVER, M.; ALI, S. Z.; SANDHYA, V.; RASUL, A.; VENKATESWARLU, B. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 27, p. 1231-1240, 2011. DOI:10.1007/s11274-010-0572-7.

GUALTER, R. M. R. Efeito da inoculação com diferentes estirpes de rizóbio na nodulação, fixação biológica de nitrogênio e na produtividade em feijão-caupi. 2010. p. 72. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

GUIMARÃES, G. S.; RONDINA, A. B. L.; SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Pointing Out Opportunities to Increase Grassland Pastures Productivity via Microbial Inoculants: Attending the Society's Demands for Meat Production with Sustainability. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1748, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12081748

HALLAM, S.J.; MCCUTCHEON, J.P. Microbes don't play solitaire: how cooperation trumps isolation in the microbial world. **Environmental Microbiology Reports**, v. 7, n. 1, p. 26–28, 2015. DOI: 10.1111/1758-2229.12248

HE, X.; MCLEAN, J. S.; GUO, L.; LUX, R.; SHI, W. The social structure of microbial community involved in colonization resistance. **ISME Journal**, v. 8, p. 564–574, 2014.

HECTOR, A.; SCHMID, B.; BEIERKÜHNLEIN, C.; CALDEIRA, M.C.; DIEMER, M.; DIMITRAKOPOULOS, P.G.; FINN, J.A., et al. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. **Science**, n. 286, p.1123– 1127, 1999.

HOOPER, D.U.; CHAPIN, F.S.; EWEL, J.J.; HECTOR, A.; INCHAUSTI, P.; LAVOREL, S.; LAWTON, J.H.; LODGE, D.M.; LOREAU, M.; NAEEM, S.; SCHMID, B.; SETALA, H.; SYMSTAD, A.J.; VANDERMEER, J.; WARDLE, D.A. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. **Ecological Monographs**, n.75, p. 3– 35, 2005.

HOOPER, D.U.; DUKES, J.S. Overyielding among plant functional groups in a long-term experiment. **Ecology Letters**, n.7, p. 95– 105, 2004.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; CAMPO, R.J.; CRISPINO, C.C.; MORAES, J.Z.; SIBALDELLI, R.N.R.; MENDES, I.C.; ARIHARA, J. Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and of N fertilizer to grain yield. **Canadian J. Plant Sci.** p. 927-939, 2006. DOI:10.4141/P05-098

HUNGRIA, M.; MENDES, I.C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? de Bruijn F.J. (Ed.), Biological Nitrogen Fixation, **Wiley**, p. 1009-1023, 2015. DOI:10.1002/9781119053095.ch99

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica de nitrogênio, 2020. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1000560>

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Tecnologias de inoculação da cultura da soja: Mitos, verdades e desafios. In: Boletim de Pesquisa n. 19, 2019/2020. Rondonópolis: Fundação MT. p. 50-62. (Fundação MT. Boletim, 19), 2019.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, p. 791-801, 2013 DOI:10.1007/s00374-012-0771-5.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Soybean seed co-inoculation with Bradyrhizobium spp. and *Azospirillum brasilense*: A new biotechnological tool to improve yield and sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, p. 811-817. DOI:10.4236/ajps.2015.66087, 2015.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Tecnologia de coinoculação da soja com Bradyrhizobium e *Azospirillum*: Incrementos na produtividade com sustentabilidade e baixo custo. Comissão de Nutrição vegetal, Fertilidade e Biologia do solo. p. 151-153. 2013.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; CAMPOS, L.J.M.; MENNA, P.; BRANDI, F.; RAMOS, Y.G. Seed pre-inoculation with Bradyrhizobium as time optimizing option for large-scale soybean cropping systems. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 5222-5236, 2020. DOI:10.1002/agj2.20392

JAT, H. S.; DATTA, A.; CHOUDHARY, M.; SHARMA, P. C.; YADAV, A. K.; CHOUDHARY, V.; GATHALA, M. K.; JAT, M. L.; MCDONALD, A. Climate Smart Agriculture practices improve soil organic carbon pools, biological properties and crop productivity in cereal-based systems of North-West India. **Catena**, v. 181, p. 1-12, 2019.

JAYARAMAIAH, R.H.; MARTINS, C.S.C.; EGIDI, E.; MACDONALD, C.A.; WANG, J.T.; LIU, H.; REICH, P.B.; BAQUERIZO, M.D.; SINGH, B.K. Soil function-microbial diversity relationship is impacted by plant functional groups under climate change. **Soil Biology and Biochemistry** v. 200, n.1, p. 109623, 2024. DOI: 10.1016/j.soilbio.2024.109623

KUMAR, A.; CHOUDHARY, A.K. Food-energy-carbon nexus of Himalayan okra–pea cropping system: impacts of AM-fungi, precision phosphorus and irrigation regimes in an acid Alfisol **Science Total Environmental**, v. 899, 2023. Article 165589, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165589

KUMAR, V.; GATHALA, M.K.; SAHARAWAT, Y.S.; PARIHAR, C.M.; KUMAR, R.; KUMAR, B.; KURI, R. Nutrients and host attributes modulate the abundance and functional traits of phyllosphere microbiome in rice. **Soil Use Management**, v. 35, p. 303-313, 2018. DOI: 10.1111/sum.12473

LAL, R. A system approach to conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 70, n. 4, p. 82A-88A, 2015.b.

LAMPURLANÉS, J.; PLAZA-BONILLA, D.; ÁLVARO-FUENTES, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Long-term analysis of soil water conservation and crop yield under different tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. **Field Crops Research**, v. 189, p. 59–67, 2016.

LI, L.; MA, J.; MARK IBEKWE, A.; WANG, Q.; YANG, C. H. Influence of *Bacillus subtilis* B068150 on cucumber rhizosphere microbial composition as a plant protective agent. **Plant and Soil**, v. 429, n. 1–2, p. 519–531, 2018 a.

LIN, Y.; WATTS, D. B.; KLOEPPER, J. W.; FENG, Y.; TORBERT, H. A. Influence of plant growth promoting rhizobacteria on corn growth under drought stress. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 2, p. 250-264, 2020. DOI: 10.1080/00103624.2019.17 05329.

LOREAU, M.; NAEEM, S.; INCHAUSTI, P.; BENGTSSON, J.; GRIME, J.P.; HECTOR, A.; HOOPER, D.U.; HUSTON, M.A.; RAFFAELLI, D.; SCHMID, B.; TILMAN, D.; WARDLE, D.A. Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. **Science**, n. 294, p.804– 808, 2001.

LOURENÇO, K. S.; SULEIMAN, A. K. A.; PIJL, A.; VAN VEEN, J. A.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Resilience of the resident soil microbiome to organic and inorganic amendment disturbances and to temporary bacterial invasion. **Microbiome**, v. 6, p. 1–12, 2018.

LUPWAYI, N.Z.; CLAYTON, G.W.; RICE, W.A. Rhizobial inoculants for legume crops. **Journal of Crop Improvement**, v. 15, p. 289-321, 2005.

MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2a ed., Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MARSHALL, B.; BISCOE, P.V. A Model for C3 Leaves Describing the Dependence of Net Photosynthesis on Irradiance. **Journal Exp. Bot.**, n. 31, p. 29–39, 1980. DOI:10.1093/jxb/31.1.29

MENDONÇA, V. Z. De; MELLO, L. M. M. De; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; YANO, É. H.; PEREIRA, F. C. B. L. Nutrient release from forage straw intercropped with maize and followed by soybean. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 183–193, 2015. DOI:10.1590/01000683rbc20150666

MUÑOZ-ROJAS, M.; ERICKSON, T. E.; DIXON, K. W.; MERRITT, D. J. Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. **Society for Ecology Restoration**, n. 24, 2016 DOI:10.111/rec.12368.

NIXON, D. M.; SIJO, J.; PAARI, K.A. Microbial biofertilizers: A sustainable agricultural approach to augment crop resilience against biotic and abiotic stresses. **Plant Science Today**, v. 13, p 1-8, 2026. DOI: 10.14719/pst.8837

NOUHA, K.; HOANG, N.; TYAGI, R. D. Fourier transform infrared spectroscopy and liquid chromatography mass spectrometry study of extracellular polymer substances produced on secondary sludge fortified with crude glycerol. **Journal of Material Science & Engineering**, v. 5, n. 3, article 100240, 2016. DOI:10.4172/2169-0022.1000240.

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C. The Ability of Conservation Agriculture to Conserve Soil Organic Carbon and the Subsequent Impact on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties and Yield. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, n. 31, 2020.

PAGE, K. L.; DANG, Y. P.; DALAL, R. C.; REEVES, S.; THOMAS, G.; WANG, W.; THOMPSON, J. P. Changes in soil water storage with no-tillage and crop residue retention on a Vertisol: Impact on productivity and profitability over a 50 year period. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 60, p. 104319, 2019.

PARADA-PINILLA, M. P.; FERREIRA, M. A.; RONCALLO, J. C.; SANTOS, S. N.; MELO, I. S.; ASSEF, A. N. R.; WILKE, D. V.; SILVA, L. F.; GARRIDO, L. M.; ARAÚJO, W. L.; PADILLA, G. Biopolymer production by halotolerant bacteria isolated from Caatinga biome. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, p. 547-559, 2021. DOI:10.1007/s42770-021-00426-1.

PARKINSON, K. J.; DAY, W.; LEACH, J. E. A Portable System for Measuring the Photosynthesis and Transpiration of Gramineous Leaves, **Journal of Experimental Botany**, v. 31, n. 5, p. 1441-1453, 1980 DOI:10.1093/jxb/31.5.1441

PEREIRA, G. M. A.; DE CARVALHO, R.; DA CUNHA, M. G.; FILHO, R. C. Combination of *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium japonicum* in the promotion of initial corn growth. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 1, 2021. DOI: 10.32404/rean.v8i1.5360

PRADHAN, A.; CHAN, C.; ROUL, P. K.; HALBRENDT, J.; SIPES, B. Potential of conservation agriculture (CA) for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach. **Agricultural Systems**, v. 163, p. 27–35, 2018.

QUAGGIO, J.A.; CANTAREKKA, H. MATTOS JÚNIOR D.; BOARETTO, R. M. VAN RAIJ, B. **Boletim 100 Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 3 ed. Campinas: Instituto Agronomico de Campinas (IAC), p. 500, 2022.

R CORE TEAM. R: **A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Version 4.1.0. Vienna. 2021.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018.

RAIJ, B. VAN et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: **Instituto Agrônomo**, n. 19, p. 285, 2001.

RAIJANNA, G.A.; DASS, A.; SINGH, V.K.; CHOUDHARY, A.K.; VENKATESH, P.; BABU, S.; UPADHYAY, P.K.; SANNAGOUDAR, M.S.; AJAY, B.C.; REDDY, V.K. Energy and carbon budgeting in a soybean–wheat system in different tillage, irrigation, and fertilizer management practices in south-Asian semi-arid agroecology. **European Journal of Agronomy**, v. 148, 2023. Article 126877, DOI:10.1016/j.eja.2023.126877

REGELINK, I. C.; STOOF, C. R.; ROUSSEVA, S.; WENG, L.; LAIR, G. J.; KRAM, P.; NIKOLAIDIS, N. P.; KERCHEVA, M.; BANWART, S.; COMANS, R. N. J. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. **Geoderma**, v. 247–248, p. 24–37, 2015.

ROSCHER, C.; TEMPERTON, V.M.; SCHERER-LORENZEN, M.; SCHMITZ, M.; SCHUMACHER, J.; SCHMID, B.; BUCHMANN, N.; WEISSER, W.W.; SCHULZE, E.D. Overyielding in experimental grassland communities – irrespective of species pool or spatial scale. **Ecology Letters**, n. 8, p.419– 429, 2005.

RYAN, P. R.; DELHAIZE, E.; JONES, D. L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 52, p. 527-560, 2001. DOI:10.1146/annurev.arplant.52.1.527.

SANDHYA, V.; ALI, S. Z.; GROVER, M.; REDDY, G.; VENKATESWARLU, B. Effect of plant growth promoting *Pseudomonas* spp. on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress. **Plant Growth Regulation**, v. 62, p. 21-30, 2010. DOI:10.1007/s10725-010-9479-4.

SANTHANAM, R.; LUU, V. T.; WEINHOLD, A.; GOLDBERG, J.; OH, Y.; BALDWIN, I. T. Native root-associated bacteria rescue a plant from a sudden-wilt disease that emerged during continuous cropping. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, p. E5013– E5020, 2015.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5.ed. rev. ampli. Brasília, DF: **EMBRAPA**, 2018.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. **AMB Express**, v. 9. 2019. DOI:10.1186/s13568-019-0932-0.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e.0200128, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcS20200128

SHRIVAS, V.L.; CHOUDHARY, A.K.; SHIDTURE, S.; RAMBIA, A.; HARIPRASAD, P.; SHARMA, S. Organic amendments modulate the crop yield and rhizospheric bacterial community diversity: A 3-years field study with *Cajanus cajan*. **Internacional Microbiology**, v. 27, p. 477-490, 2024. DOI: 10.1007/s10123-023-00396-4

SILVA, F. C.; SILVA, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2009.

SILVA, F.S.; DOMICIANO, L.F.; GOMES, F.J.; SOLLENBERGER, L.E.; PEDREIRA, C.G.S.; PEREIRA, D. H.; PEDREIRA, B.C. Herbage accumulation, nutritive value and beef cattle production on marandu palisadegrass pastures in integrated systems. **Agrofor. Syst.**, 2020. DOI: 10.1007/s10457-020-00508-3.

SOMASUNDARAM, J.; SALIKRAM, M.; SINHA, N. K.; MOHANTY, M.; CHAUDHARY, R. S.; DALAL, R. C.; MITRA, N. G.; BLAISE, D.; COUMAR, M. V.; HATI, K. M.; THAKUR, J. K.; NEENU, S.; BISWAS, A. K.; PATRA, A. K.; CHAUDHARI, S. K. Conservation agriculture effects on soil properties and crop productivity in a semiarid region of India. **Soil Research**, v. 57, n. 2, p. 187–199, 2019.

SOUSA, W. S.; TEIXEIRA, I. R.; CAMPOS, T. S.; SILVA, G. C.; SILVA, M. B.; MOREIRA, S. G. Supplementary reinoculation in topdressing of *Rhizobium tropici* in common bean crop: effects on nodulation, morphology, and grain yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, 2021. DOI: 10.1080/01904167.2021.2020833

SPENCER, B. Studies on sulphatases: Enzymic cleavage of aryl hydrogen sulphates in the presence of H. **Biochem. Journal.**, v.69, p.155-159, 1958.

STRAUB, D.; YANG, H.; LIU, Y.; TSAP, T.; LUDEWIG, U. Root ethylene signalling is involved in *Miscanthus sinensis* growth promotion by the bacterial endophyte *Herbaspirillum frisingense* GSF30T. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, p. 4603–4615, 2013.b.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Use of r-nitrofenol phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, n. 1, p. 301-307, 1969.

TAMBURINI, G.; BOMMARCO, R.; WANGER, T.C.; KREMEN, C.; HEIJDEN, M. G.A.; LIEBMAN, M.; HALLIN. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. **Science Advances**, v. 6, 2020. DOI: 10.1126/sciadv.aba1715

TEIXEIRA, I. R.; LOPES, P. R.; SOUSA, W. S.; SILVA, G. C. Response of common bean to rhizobium reinoculation in topdressing. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 274-282, 2022. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v26n4p274-282

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., & TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo (3a ed.). Brasília: Embrapa, 2017.

THAPA, S.; PRASANNA, R.; RANJAN, K.; VELMOUROUGANE, K.; RAMAKRISHNAN, B. Nutrients and host attributes modulate the abundance and functional traits of phyllosphere microbiome in rice. **Microbiological Research**, v. 204, p. 55-64, 2017. DOI: 10.1016/j.micres.2017.07.007

THIERFELDER, C.; MATEMBA-MUTASA, R.; RUSINAMHODZI, L. Yield response of maize (*Zea mays* L.) to conservation agriculture cropping system in Southern Africa. **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 230–242, 2015.

THIES, J.E.; SINGLETON, P.W.; BOHLOOL, B.B. Influence of size of indigenous rhizobial populations on establishment and symbiotic performance of introduced rhizobia on field-grown legumes. **Appl Environ Microbiol**. v. 57, p. 19-28, 1991. DOI:10.1128/aem.57.1.19-28.1991.

THIES, J.E.; WOOMER, P.L.; SINGLETON, P.W. Enrichment of Bradyrhizobium spp populations in soil due to cropping of the homologous host legume. **Soil Biol. Biochem.**, n. 27, p. 633-636, 1995. DOI:10.1016/0038-0717(95)98643-3

TIEMANN, L.K.; GRANDY, A.S.; ATKINSON, E.E.; MARIN-SPIOTTA, E.; DANIEL, M. D. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. **Ecology Letters**, v.18, p. 761-771, 2015. DOI: 10.1111/ele.12453

TIEN, T. M.; GASKINS, M. H.; HUBBELL, D. H. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). **Applied and Environmental Microbiology**, v. 37, n. 5, p. 1016–1024, 1979.

TIMM, C. M.; CARTER, K. R.; CARRELL, A. A.; JUN, S.; JAWDY, S. S.; VÉLEZ, J. M.; GUNTER, L. E.; YANG, Z.; NOOKAEW, I.; ENGLE, N. L.; LU, T. S.; SCHADT, C. W.; TSCHAPLINSKI, T. J. Abiotic Stresses Shift Belowground Populus-associated bacteria toward a core stress microbiome. **Systems**, v. 3, p. 1–17, 2018.

TORSVIK, V.; OVREAS, L. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. **Current Opinion in Microbiology**, v. 5, n. 3, p. 240-245, 2002. DOI: 10.1016/S1369-5274(02)00324-7.

Universidade Estadual Paulista. (2024). *Canal Clima da UNESP Ilha Solteira*. <http://clima.feis.unesp.br/> (Acessado em: 7 November 2024)

UPADHYAY, S.; SINGH, J.; SINGH, D. Exopolysaccharide-producing plant growth promoting rhizobacteria under salinity condition. **Pedosphere**, v. 21, n. 2, p. 214-222, 2011. DOI: 10.1016/S1002-0160(11)60120-3.

VANCE, E. D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. Na extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, p. 703-707, 1987.

VILLEGAS, J.; FORTIN, J. A. Phosphorous solubilization and pH changes as a result of the interactions between soil bacteria and arbuscular mycorrhizae fungi on a medium containing NO₃ as nitrogen source. **Canadian Journal of Botany**, v. 80, n. 5, p. 571-576, 2002. DOI: 10.1139/b02-038.

XU, L.; NAYLOR, D.; DONG, Z.; SIMMONS, T.; PIERROZ, G.; HIXSON, K. K.; KIM, Y.; ZINK, E. M.; ENGBRECHT, K. M.; WANG, Y.; GAO, C.; DEGRAAF, S.; MADERA, M. A.; SIEVERT, J. A.; HOLLINGSWORTH, J.; BIRDSEYE, D.; SCHELLER, H. V.; HUTMACHER, R.; DAHLBERG, J.; JANSSON, C.; TAYLOR, J. W.; LEMAUX, P. G.; COLEMAN-DERR, D. Drought delays development of the sorghum root microbiome and enriches for monoderm bacteria. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, p. 4284-4293, 2018.

YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun. Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

YU, H.; ZOU, W.; CHEN, J.; CHEN, H.; YU, Z.; HUANG, J.; TANG, H.; WEI, X.; GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 8–21, 2019.

ZHANG, J.; SÁEZ-SANDINO, T.; MAESTRE, F.T.; FENG, Y.; YU, Y.; BERDUGO, M.; WANG, J.; COLEINE, C.; GARCÍA-VELÁZQUES, L.; SINGH, B.K.; DELGADO-BAQUERIZO, M. Global environmental dependences of soil biodiversity and functions are modified by water availability thresholds. **Science of the Total Environment**, v. 1, n. 958, p. 178033, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178033

ZHANG, L.; WU, X.-X.; WANG, J.; QI, C.; WANG, X.; WANG, G.; LI, M.; LI, X.; GUO, Y.-D. BoALMT1, an Al-Induced Malate Transporter in Cabbage, Enhances Aluminum Tolerance in Arabidopsis Thaliana. **Front. Plant Sci.** v. 8, n. 8, p. 435–444, 2018. DOI:10.3389/fpls.2017.02156

ZHAO, J.; YANG, Y.; ZHANG, K.; JEONG, J.; ZENG, Z. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 245, Article 107659, 2020. DOI: 10.1016/j.fcr.2019.107659

ZORNOZA, R.; ACOSTA, J.A.; BASTIDA, F.; DOMINGUEZ, S.G.; TOLEDO, D.M.; FAZ, A. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. **Soil**, v. 1, n.1, p.173–185, 201

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 CAPÍTULO 1- ANÁLISES DO SOLO

7.1.1 Atividades enzimáticas e biológicas

A análise das atividades enzimáticas do solo revelou variações significativas em resposta às estratégias de inoculação (Tabela 4; Figura 4).

Tabela 4 – Atividades enzimáticas arilsulfatase (Aril), β -glicosidase (Beta), fosfatase ácida (Fosf), teores de carbono da biomassa microbiana (CBM) e atividade respiratória microbiana (ARM), nas safras de 2023 e 2025.

Atividade microbiológica do solo em função da inoculação e inoculação adicional							
Ano	Inoc	Fator Inoc.	Atributos do solo				
Safra		Adicional	Aril	Beta	Fosf	CBM	ARM
2023	1	1	28,70 ^d	78,15 ^{bc}	198,70 ^b	0,39 ^b	0,51 ^{bc}
		2	35,91 ^{cd}	77,97 ^{bc}	184,21 ^{bc}	0,47 ^{ab}	0,44 ^c
	2	1	42,60 ^{bc}	63,43 ^c	152,40 ^c	0,40 ^b	0,40 ^c
		2	40,45 ^{bc}	68,01 ^c	146,21 ^c	0,40 ^b	0,48 ^{bc}
	3	1	75,44 ^a	120,83 ^a	209,82 ^{ab}	0,53 ^a	0,64 ^{ab}
		2	79,00 ^a	117,99 ^a	218,69 ^a	0,48 ^{ab}	0,57 ^{bc}
	4	1	50,27 ^b	84,44 ^b	203,21 ^{ab}	0,41 ^b	0,66 ^{ab}
		2	47,68 ^b	85,10 ^b	207,71 ^a	0,40 ^b	0,77 ^a
2025	1	1	79,29 ^a	86,35 ^b	349,18 ^a	1,07 ^a	11,57 ^a
		2	67,50 ^a	83,17 ^{bc}	378,76 ^a	0,93 ^a	7,72 ^a
	2	1	64,76 ^a	88,26 ^b	307,65 ^a	1,16 ^a	10,72 ^a
		2	74,26 ^a	65,89 ^c	288,45 ^a	0,86 ^a	11 ^a 15 ^a
	3	1	77,75 ^a	85,17 ^{bc}	332,90 ^a	1,32 ^a	17,14 ^a
		2	68,52 ^a	71,49 ^{bc}	311,94 ^a	1,16 ^a	11,58 ^a
	4	1	75,98 ^a	70,83 ^{bc}	366,01 ^a	0,12 ^b	13,29 ^a
		2	70,19 ^a	103,63 ^a	247,09 ^a	0,16 ^b	11,57 ^a

Fonte: produção da própria autora

Nota: Médias seguidas por letras distintas nas colunas, dentro de cada safra, indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Aril: Arilsulfatase (mg PNF kg⁻¹ solo. Hora); Beta: β -glicosidase (mg PNF kg⁻¹ solo. Hora); Fosf: Fosfatase ácida (mg PNF kg⁻¹ solo. Hora); CBM: Carbono

da Biomassa Microbiana (mg C g^{-1}); ARM: Atividade Respiratória (mg g^{-1} de solo seco). Inoculação: 1- Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de Inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

De modo geral, observou-se incremento substancial na atividade biológica do solo na safra 2025 (Tabela 4, Figura 4). Com exceção da β -glicosidase, que manteve estabilidade entre os períodos ($p > 0,05$) 2023 e 2025, todos os indicadores apresentaram crescimento significativo ($p \leq 0,05$), com destaque para a fosfatase ácida e os níveis de atividade respiratória microbiana (ARM) na safra de 2025 por apresentarem altos teores de atividade microbiológica.

Esse padrão de intensificação temporal está alinhado com evidências recentes demonstram que a progressão temporal e o estabelecimento de práticas de manejo modificam consistentemente os perfis enzimáticos e a estequiometria do solo (Wang; Zhang, 2024; Tül; Frantzeskou; Paranychanakis, 2025). De acordo com Kong *et al.* (2023) houve dinâmicas sazonais pronunciadas em atividades enzimáticas do solo sob diferentes usos da terra, com variações significativas para β -glicosidase, fosfatase e outras hidrolases ao longo do ano. Essas flutuações refletem mudanças na disponibilidade de substratos, condições abióticas (temperatura, umidade) e demanda nutricional microbiana (Sinsabaugh *et al.*, 2008; Kong *et al.*, 2023).

Em 2023, as atividades da arilsulfatase e da β -glicosidase atingiram seus maiores valores sob o tratamento de inoculação 3, independentemente da inoculação adicional, diferenciando-se dos demais tratamentos ($p \leq 0,05$). A arilsulfatase variou de 28,70 a 79,00 mg PNF kg^{-1} solo. hora, com os tratamentos 3 apresentando valores médios de 77,22 mg PNF kg^{-1} solo. hora, representando incremento de aproximadamente 139% em relação ao tratamento 1 (média de 32,31 mg PNF kg^{-1} solo. hora).

A fosfatase ácida seguiu tendência semelhante, com níveis variando de 146,21 a 218,69 mg PNF kg^{-1} solo. Hora, e pico de atividade também no tratamento 3 (média de 214,26 mg PNF kg^{-1} solo. hora). Essa co-resposta entre arilsulfatase e fosfatase ácida sugere acoplamento funcional entre os ciclos do enxofre (S) e fósforo (P), mediado por demandas microbianas sincronizadas (Kwiatkowska; Joniec, 2022).

Em contraste, o CBM e o ARM mantiveram-se em patamares reduzidos nesta fase inicial, com o ARM não ultrapassando 0,77 CO_2 (mg g^{-1} de solo seco) e a CBM variando entre 0,39 e 0,53 mg C g^{-1} . Esse padrão sugere-se que os efeitos do SPD

consolidado aliado com os efeitos dos tratamentos em fase inicial de manifestação (estabelecimento), com limitado acúmulo de biomassa residual e decomposição incipiente de materiais celulósicos (Allison; Vitousek, 2005).

Nesta fase inicial do experimento, a *Bradyrhizobium* inoculado na semente e a *Azospirillum* inoculado no sulco de semeadura pode ter promovido o estabelecimento de comunidades microbianas metabolicamente ativas, com capacidade aumentada de mineralizar S e P, enquanto a decomposição de carbono estrutural (celulose) ainda era limitada pela baixa disponibilidade de substratos recalcitrantes ou por condições edáficas sub-ótimas (Burns *et al.*, 2013).

Após os três anos de cultivo (Tabela 4), houve salto expressivo na atividade metabólica e no aporte de carbono. O ARM exibiu a variação mais acentuada, atingindo 17,14 CO₂ (mg g⁻¹ de solo seco) no tratamento 3 (Inoculação 3, Fator 1) e médias gerais superiores a 11,00 CO₂ (mg g⁻¹ de solo seco). Esse aumento expressivo da atividade respiratória microbiana indica maior atividade metabólica da microbiota do solo, provavelmente associada ao maior aporte de resíduos vegetais e à maior disponibilidade de substratos orgânicos ao longo do período experimental (Tabela 3).

Além disso, se todos os tratamentos, inclusive o controle, apresentaram um aumento expressivo da ARM entre 2023 e 2025, isso sugere fortemente que o principal fator responsável pelo aumento não foi a inoculação, mas algum fator comum a todas as parcelas, tal como, o acúmulo de efeitos do sistema de produção (SPD + soja + sorgo/braquiária), maior aporte de resíduos vegetais ao longo dos anos, diferenças climáticas entre as safras, diferenças nas condições de coleta ou incubação.

Esse avanço foi acompanhado pela fosfatase ácida, que elevou sua média de 190 mg PNF kg⁻¹ solo. hora (Tabela 3) para valores superiores a 320 mg PNF kg⁻¹ solo. hora, em 2025 ($p \leq 0,05$) e a arilsulfatase, que evoluiu de 50 para mais de 70 mg PNF kg⁻¹ solo. hora. O CBM praticamente dobrou sua atividade (de 0,43 para 0,83, ou seja, incremento de 93%), sugerindo a aceleração da decomposição de resíduos vegetais e maior ciclagem de carbono estrutural (Caldwell, 2005).

De acordo com Wang e Zhang (2024) a fertilização orgânica de longo prazo aumentou o carbono orgânico do solo e impulsionou atividades de β -glicosidase e fosfatase, produzindo redes microbianas mais complexas e maior abundância de táxons-chave. No presente estudo, o aumento expressivo na ARM em 2025 sugere maior aporte de carbono lábil, que pode ter mediado os incrementos enzimáticos

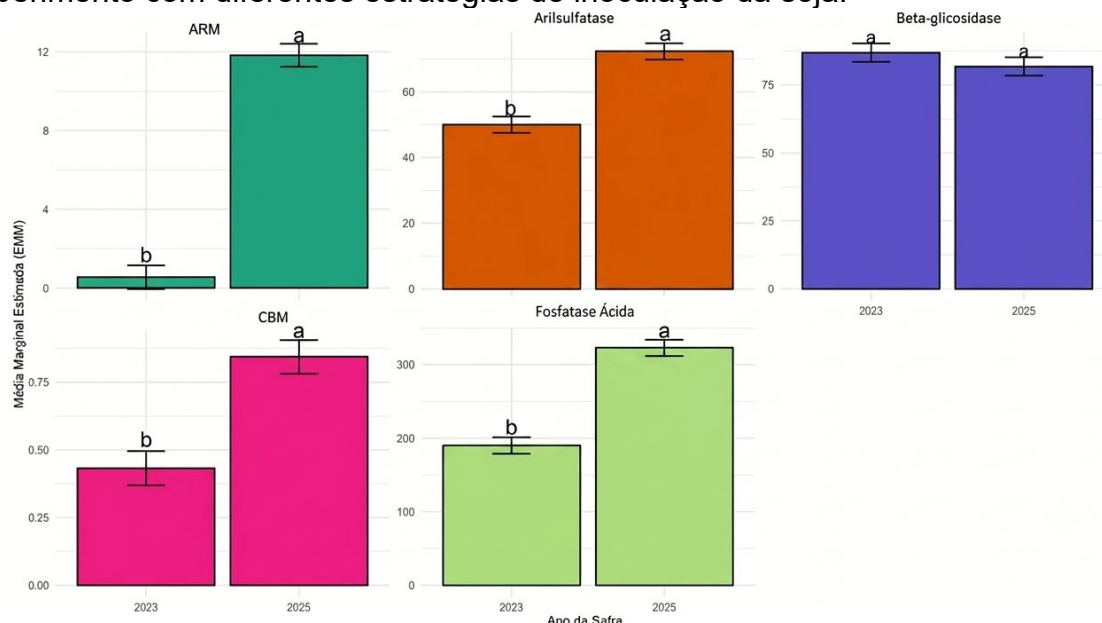
observados por meio de substratos lábeis que estimulam a decomposição da matéria orgânica mais estável (Kuzyakov; Friedel; Stahr, 2000) e, também, o carbono disponível sustenta a maior biomassa e diversidade microbiana (Wang e Zhang, 2024), além da energia metabólica adicional que permite maior produção de enzimas extracelulares.

Diferente do início do experimento, a arilsulfatase apresentou comportamento mais homogêneo entre os tratamentos 1, 2 e 3 após 3 ciclos de cultivo, sem diferenças significativas ($p > 0,05$), com valores variando de 64,76 a 79,29 mg PNF kg⁻¹ solo. hora. Essa homogeneização sugere que o estabelecimento do sistema microbiano ao longo do tempo pode ter atenuado as diferenças iniciais entre estratégias de inoculação, levando a patamar funcional elevado e mais uniforme (Nannipieri *et al.*, 2012).

Por outro lado, a β -glicosidase registrou sua maior expressão (103,63 mg PNF kg⁻¹ solo. hora) na estratégia de Inoculação 4.2, diferenciando-se significativamente dos demais tratamentos (Tabela 4). A maior atividade da β -glicosidase na safra de 2025 pode ser atribuída às alterações na composição da comunidade microbiana ou das mudanças na qualidade, quantidade dos resíduos vegetais, das variações sazonais nas prioridades de aquisição do carbono e nutrientes, pelos efeitos acumulativos das estratégias da inoculação adicional (Primec *et al.*, 2024). Em conjunto, os dados ratificam que a continuidade das práticas de inoculação e o tempo de estabelecimento do sistema favoreceram a saúde biológica do solo. Esse cenário resultou na potencialização do metabolismo do fósforo e enxofre, bem como em maior acúmulo de biomassa residual, conforme evidenciado pelo incremento generalizado na atividade das enzimas hidrolíticas analisadas.

Na comparação entre 2023 e 2025, observou-se aumento significativo da atividade respiratória microbiana, arilsulfatase, fosfatase ácida e carbono da biomassa microbiana, enquanto a atividade da β -glicosidase permaneceu estável. Esses resultados indicam incremento da atividade biológica do solo ao longo do período experimental (Figura 4).

Figura 4 – Comparativo dos Indicadores bioenzimáticos do solo no início e final do experimento com diferentes estratégias de inoculação da soja.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras distintas indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras de erro representam o erro padrão da média.

Diferenças de temperatura, umidade e ciclos de umedecimento e secagem do solo, podem ter influenciado na atividade das enzimas e atividade biológica do solo, uma vez que cada complexo enzimático possui condições ótimas distintas (Steinweg *et al.*, 2008; Davidson; Janssens, 2006; Schimel; Schaeffer, 2012; Kong *et al.*, 2023).

Embora a composição microbiana não tenha sido avaliada diretamente, é possível que a introdução da inoculação adicional, proporcionou maior atividade dos microrganismos no ambiente do que no início do experimento. A transição de uma comunidade de fase inicial de estabelecimento (2022) para uma fase madura (2025) pode ter levado as diferentes combinações de processos associado à escala temporal, o que pode ter moldado a formação das comunidades microbianas, aumentando a conectividade da rede dos microrganismos (Nemergut *et al.*, 2013; Philippot *et al.*, 2013; Wang; Zhang, 2024).

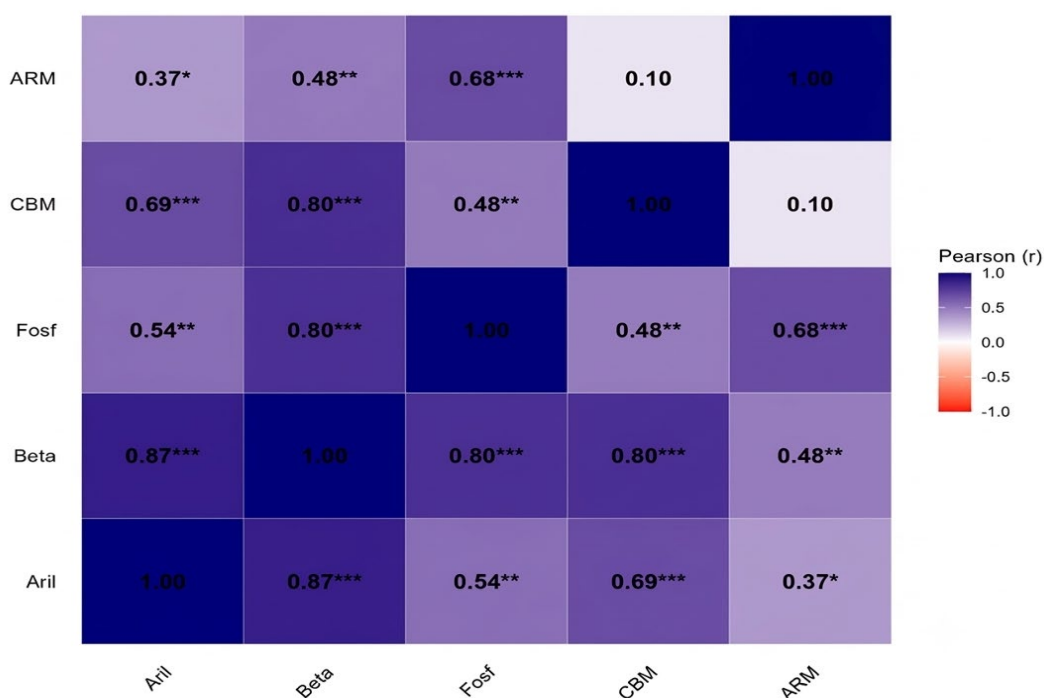
Por fim, a qualidade do carbono acumulado em 2025 foi essencial para que houvesse aumento de 93% na atividade do CBM, sugerindo que, o material acumulado, possua maior teor de compostos recalcitrantes, como a celulose. Essa situação favorece grupos específicos, como fungos, alterando o perfil enzimático e a demanda por β -glicosidase (Sinsabaugh; Carreiro; Repert, 2002; Strickland; Rousk, 2010). Assim, como observado por Wang e Zhang (2024), onde o aumento do COS

promoveu redes mais complexas, a ARM no presente trabalho gerou diversos efeitos que dependeram intrinsecamente da qualidade e labilidade do carbono que foi incorporado no solo.

7.1.2 Correlações entre os parâmetros enzimáticos e biológicos do solo no início e final do experimento

As análises de correlação de Pearson revelaram dinâmicas distintas na interdependência enzimática entre as safras avaliadas (Figuras 5 e 6). No início (Figura 5), observou-se correlação entre todos os sistemas enzimáticos. Destaca-se a forte correlação positiva e altamente significativa entre a β -glicosidase e a Arilsulfatase ($r = 0,87$; $p < 0,001$), bem como entre a β -glicosidase e a Fosfatase Ácida ($r = 0,80$; $p < 0,001$).

Figura 5 – Matriz de correlação de Pearson entre as atividades enzimáticas do solo no início do período experimental (2023).



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: (Arilsulfatase - Aril; β -glicosidase - Beta; Fosfatase Ácida - Fosf; Carbono da biomassa microbiana - CBM; Atividade respiratória microbiana - ARM). A intensidade da cor azul-marinho indica a força das correlações positivas. Asteriscos representam níveis de significância estatística: * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$) e *** ($p < 0,001$).

As fortes correlações observadas entre β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida sugerem que essas enzimas atuam de forma integrada na ciclagem de carbono, enxofre e fósforo. Esse padrão é consistente com estudos que identificaram a β -glicosidase como um importante componente de redes enzimáticas do solo (Xing *et al.*, 2024).

A atividade da β -glicosidase covaria com a complexidade e diversidade da rede enzimática mais ampla, e maior atividade do perfil enzimático bruto prediz maior tamanho e diversidade da microbiota (Xing *et al.*, 2024). Táxons microbianos indicadores em solos fertilizados organicamente foram significativamente correlacionados positivamente com a β -glicosidase, e solos com maior atividade de β -glicosidase apresentaram redes mais complexas e mais táxons-chave (Wang; Zhang, 2024). Mudanças sazonais na razão β -glicosidase (β -glicosidase + fosfatase alcalina) refletem prioridades microbianas cambiantes entre aquisição de C e P durante estações frias versus períodos de crescimento ativo (Tül; Frantzeskou; Paranychianakis, 2025).

No presente estudo, as correlações $r = 0,87$, $p < 0,001$ com arilsulfatase e $r = 0,80$, $p < 0,001$ com fosfatase ácida posicionam inequivocadamente a β -glicosidase como o nó central da rede enzimática no início do experimento conectando a decomposição de carbono lábil (polissacarídeos) com a mineralização de enxofre e fósforo. Microrganismos decompositores requerem C, N, P e S em proporções relativamente fixas (estequiometria microbiana). Quando um elemento é liberado por meio da atividade enzimática (ex: glicose via β -glicosidase), a demanda simultânea por outros elementos (P, S) estimula a produção de fosfatases e arilsulfatase (Sternner; Elser, 2002; Sinsabaugh; Hill; Follstad Shah, 2009).

A disponibilidade de carbono lábil fornece energia metabólica (ATP) necessária para a síntese de todas as enzimas extracelulares, criando uma relação positiva entre enzimas de diferentes ciclos (Allison *et al.*, 2011). Comunidades microbianas diversas e metabolicamente ativas produzem múltiplas enzimas simultaneamente, gerando correlações positivas entre atividades enzimáticas (Fierer *et al.*, 2012; Wang; Zhang, 2024) e os indicadores qualitativos de alta qualidade biológica do solo incluem maior complexidade da rede enzimática, maior diversidade de Shannon dos perfis de exoenzimas, e forte relação positiva entre enzimas-chave e pools de substratos (Xing *et al.*, 2024). Assim, o sistema mesmo no início do experimento, atende a esses critérios, uma vez que tem histórico de mais de 10 anos em SPD, com aporte

significativo de palhada (carbono).

Além das correlações envolvendo a β -glicosidase no início do período experimental, observaram-se outras associações positivas entre a Arilsulfatase e Fosfatase Ácida, refletindo ligação entre o S (enxofre) e o P (fósforo), além do CBM e β -glicosidase, ambas envolvidas na decomposição de carboidratos, e a ARM onde os substratos de carbono sustentam as atividades enzimáticas. Essas múltiplas conexões configuram uma rede densa e integrada, característica de solos com alta resiliência funcional (Griffiths; Philippot, 2013).

Em contrapartida, na safra de 2025 (Figura 6), verificou-se baixa correlação entre as variáveis. Embora a Fosfatase Ácida tenha mantido uma correlação positiva moderada com a Arilsulfatase ($r = 0,53$; $p < 0,01$), a maioria das correlações perdeu significância estatística. Nota-se que, a β -glicosidase, que foi destaque em 2023, não apresentou associações significativas com as demais enzimas em 2025.

Essa redução nas correlações da β -glicosidase com as demais enzimas, pode sinalizar uma mudança nas estratégias de aquisição de recursos microbianos e uma reorganização dos microrganismos decompositores, refletindo na alteração no suprimento de carbono, entrada e saída de comunidades microbianas ou distúrbios de manejo (Xing *et al.*, 2024; Wang; Zhang, 2024). Além disso, pode implicar no acoplamento mais fraco da despolimerização de C à aquisição de nutrientes, potencialmente limitando o fluxo de carbono para a teia alimentar microbiana e o processamento da matéria orgânica do solo (Xing *et al.*, 2024). Essa redução de correlações, pode não representar necessariamente degradação, mas sim especialização funcional em resposta a mudanças nas demandas de ciclagem de nutrientes (Shade *et al.*, 2012), e, portanto, acúmulo (sequestro) de carbono no solo.

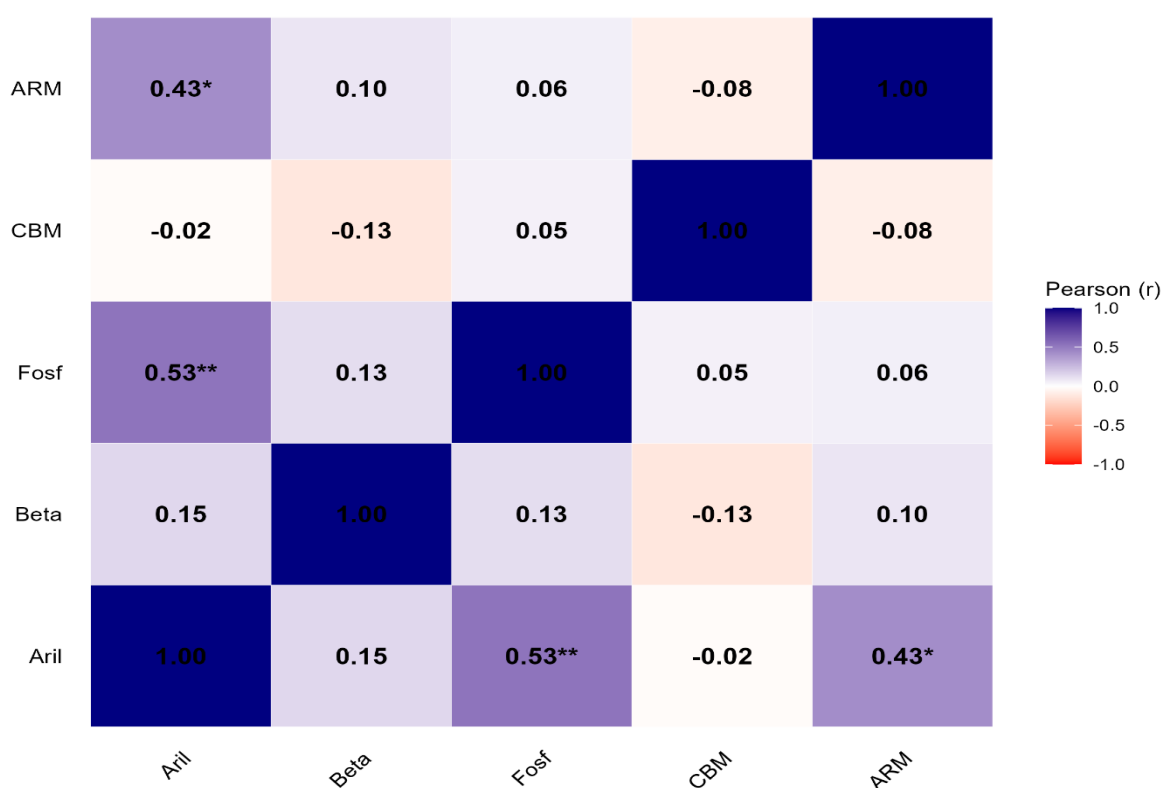
Houve correlação entre Fosfatase Ácida e Arilsulfatase na safra de 2025 ($r = 0,53$; $p < 0,01$), e essa ligação sugere que o acoplamento S–P, ocorreu porque ambas as enzimas respondem a preditores edáficos similares (pH, nutrientes disponíveis) (Chen *et al.*, 2021), além da demanda microbiana por S e P permaneceu sincronizada (Kwiatkowska; Joniec, 2022) e os grupos microbianos específicos produziram ambas as enzimas constitutivamente (Kertesz; Mirleau, 2004).

A fragmentação da interdependência enzimática observada no presente estudo, sugere que flutuações abióticas ou alterações na qualidade do aporte orgânico podem desacoplar a cinética bioquímica, comprometendo a resiliência biológica do sistema (Dick, 1994). Esse fenômeno de desarticulação das redes de correlação, é

impulsionado por múltiplos fatores que atuam de forma isolada ou sinérgica ao longo do tempo (Xing *et al.*, 2024; Tül; Frantzeskou; Paranychianakis, 2025).

No presente estudo, o incremento expressivo no aporte de resíduos vegetais ao longo do tempo, impactou na ARM, sendo em 2025 houve incrementos, representando maior quantidade de carbono (C) lábil, possivelmente saturando a demanda por esse elemento e deslocando a limitação microbiana para nutrientes como nitrogênio (N) ou fósforo (P). Consequentemente, as prioridades enzimáticas podem ter sido alteradas, favorecendo enzimas de aquisição de nutrientes (fosfatases e proteases) em detrimento daquelas ligadas ao C, como a β -glicosidase (Demoling; Figueroa; Bååth, 2007; Mooshammer *et al.*, 2014). Essa mudança na estequiometria enzimática, evidenciada pela razão β -glicosidase/(β -glicosidase + fosfatase), reflete uma reorganização das estratégias microbianas que desacopla enzimas anteriormente correlacionadas (Tül; Frantzeskou; Paranychianakis, 2025).

Figura 6 – Matriz de correlação de Pearson entre as atividades enzimáticas do solo ao final do período experimental (2025).



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: (Arilsulfatase - Aril; β -glicosidase - Beta; Fosfatase Ácida - Fosf; Carbono da biomassa microbiana - CBM; Atividade respiratória microbiana - ARM). A intensidade da cor azul-marinho indica a força das correlações positivas (+1). Asteriscos representam níveis de significância estatística: * ($p \leq 0,05$), ** ($p < 0,01$) e *** ($p < 0,001$)

7.1.3 Fracionamento físico da matéria orgânica

A análise do fracionamento físico da matéria orgânica (FMO) revelou que as estratégias de inoculação e inoculação adicional exerceram influência limitada e pontual sobre as frações de carbono, na camada superficial (0,00-0,10 m) no início do experimento (2023) (Tabela 5).

Nesse ano e profundidade, o carbono orgânico particulado (COP) apresentou resposta significativa, destacando-se o tratamento sob *Bradyrhizobium* inoculado na semente com Fator Adicional 2, que atingiu o maior valor ($5,11 \text{ g dm}^{-3}$), superando as *Bradyrhizobium* inoculado na semente e *Azospirillum* aplicado no sulco de semeadura e *Bradyrhizobium* inoculado em junto com a *Azospirillum* (Tabela 5).

Essa resposta do COP corrobora a natureza lábil desta fração, que, por ser composta majoritariamente por resíduos vegetais em estágios iniciais de decomposição, é reconhecida como indicador precoce de mudanças no manejo do solo (Giannetta *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2025), proveniente do distúrbio ocasionado pela primeira aplicação dos microrganismos no solo. O efeito positivo do *Bradyrhizobium* na semente, com inoculação adicional afetou o COP na camada superficial do solo, sugerindo possível influência dessa estratégia no aporte ou na dinâmica inicial da matéria orgânica particulada na camada superficial do solo.

A inoculação biológica pode aumentar a produção de exopolissacarídeos e a rede fúngica, promovendo a agregação do solo e a oclusão de matéria orgânica particulada, protegendo-a temporariamente contra a mineralização (Niu *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2025). A concentração desse efeito na camada de 0,00-0,10 m justifica-se pela maior atividade microbiana e aporte direto de resíduos nesta zona, onde a interação entre o inoculante e o substrato fresco é mais intensa (Leuthold *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2024).

Quanto ao COT, na camada de 0,00–0,10 m em 2023, as maiores médias foram observadas na Inoculação 3, especialmente quando associada à inoculação adicional, diferindo estatisticamente da Inoculação 2 com inoculação adicional. Esse resultado sugere uma resposta pontual do carbono orgânico total à coinoculação com *B. elkanii* nas sementes e *A. brasilense* no sulco, possivelmente relacionada ao maior aporte de resíduos vegetais e radiculares na camada superficial.

A maior disponibilidade de nitrogênio no solo proveniente da FBN reduz a relação entre o carbono e o nitrogênio, favorecendo dessa forma o desenvolvimento das plantas (Shen *et al.*, 2020; Moretti *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2026).

Para a fração do carbono orgânico mineral (COM), não foram observadas variações em nenhuma profundidade na referida safra, comportamento análogo à estabilidade observada nas frações COP e COT nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, independentemente do manejo adotado (Tabela 5). Esta estabilidade do COM reforça a teoria de que o carbono associado aos minerais possui taxas de renovação muito mais lentas, exigindo processos de saturação mineral que raramente se manifestam em um único ciclo agrícola (Zhang *et al.*, 2021; Giannetta *et al.*, 2024).

Na safra de 2025, verificou-se tendência de homogeneização dos dados. Embora os valores absolutos de COT na camada de 0,00-0,10 m tenham sido numericamente superiores aos do início do experimento (2023), não houve diferenças entre as estratégias de inoculação para COP, COT e COM em nenhuma das profundidades avaliadas ($p > 0,05$; Tabela 5). Essa situação indica que, a longo prazo ou sob as condições climáticas específicas da segunda safra (Figuras 2 A-C), o efeito isolado das estratégias de inoculação e inoculação adicional tendeu ao equilíbrio quanto ao acúmulo e fracionamento do carbono orgânico.

Além disso, o fator de duração experimental, safras e o aporte contínuo de resíduos vegetais do SPD consolidado (14 anos) podem mascarar os efeitos de curto prazo de linhagens específicas de inoculantes. Com a sucessão/rotação de culturas que ocorreu durante o período, o sistema tende a um novo estado de equilíbrio dinâmico, onde a estrutura da comunidade microbiana é moldada mais pelo substrato disponível do que pela aplicação isolada dos inoculantes (Leuthold *et al.*, 2024).

Tabela 5 – Médias dos teores de Carbono Orgânico Particulado (COP), Carbono Orgânico Total (COT) e Carbono Orgânico Mineral (COM) no solo em função de diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional nas safras de 2023 e 2025, em três profundidades.

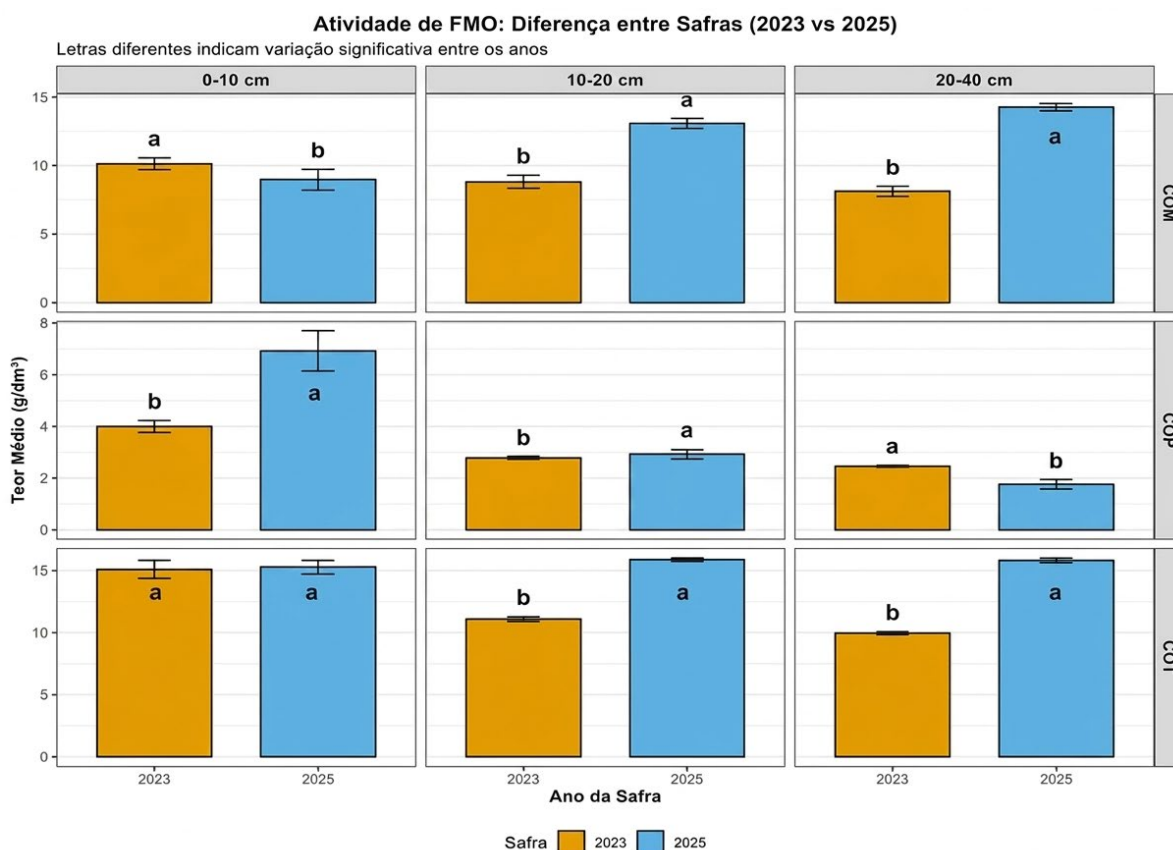
Fracionamento da Matéria Orgânica do solo em função da inoculação e inoculação adicional nas safras de 2023 e 2025											
Ano Safra	Inoculação	Fator de Inoculação Adicional	Profundidade do solo								
			0,00-0,10 m			0,10-0,20 m			0,20-0,40 m		
			COP	COT (g dm ⁻³)	COM	COP	COT (g dm ⁻³)	COM	COP	COT (g dm ⁻³)	COM
2023	1	1	3,67 ^{ab}	14,06 ^{bc}	9,60 ^a	2,63 ^a	10,59 ^a	8,36 ^a	2,47 ^a	10,01 ^a	8,89 ^a
		2	4,74 ^{ab}	14,35 ^{bc}	9,59 ^a	2,84 ^a	10,15 ^a	7,51 ^a	2,55 ^a	9,57 ^a	7,14 ^a
	2	1	3,77 ^{ab}	13,05 ^c	11,68 ^a	2,51 ^a	11,31 ^a	10,60 ^a	2,36 ^a	9,57 ^a	8,76 ^a
		2	5,11 ^a	12,61 ^c	10,49 ^a	2,88 ^a	10,88 ^a	10,27 ^a	2,51 ^a	9,57 ^a	8,46 ^a
	3	1	3,35 ^b	17,4 ^b	9,61 ^a	2,84 ^a	11,31 ^a	9,64 ^a	2,35 ^a	10,30 ^a	9,18 ^a
		2	3,88 ^{ab}	18,41 ^a	10,42 ^a	2,84 ^a	11,46 ^a	8,93 ^a	2,55 ^a	10,15 ^a	8,43 ^a
	4	1	3,23 ^b	14,79 ^{bc}	8,01 ^a	2,71 ^a	11,31 ^a	6,65 ^a	2,35 ^a	10,30 ^a	5,94 ^a
		2	4,26 ^{ab}	15,95 ^{bc}	11,70 ^a	2,96 ^a	11,75 ^a	8,61 ^a	2,51 ^a	10,15 ^a	8,13 ^a
2025	1	1	9,80 ^a	11,75 ^a	5,65 ^a	3,28 ^a	14,98 ^a	11,70 ^a	1,23 ^a	15,48 ^a	14,75 ^a
		2	10,40 ^a	15,08 ^a	6,03 ^a	3,45 ^a	15,48 ^a	12,03 ^a	2,68 ^a	15,88 ^a	13,20 ^a
	2	1	5,08 ^a	14,75 ^a	9,68 ^a	3,55 ^a	15,95 ^a	12,40 ^a	1,88 ^a	14,58 ^a	13,30 ^a
		2	5,48 ^a	16,10 ^a	10,63 ^a	2,75 ^a	16,10 ^a	13,35 ^a	1,30 ^a	16,10 ^a	14,80 ^a
	3	1	8,08 ^a	16,10 ^a	8,03 ^a	2,73 ^a	16,10 ^a	13,38 ^a	2,08 ^a	16,10 ^a	14,03 ^a
		2	5,58 ^a	16,10 ^a	10,53 ^a	3,05 ^a	16,10 ^a	13,05 ^a	1,45 ^a	16,10 ^a	14,65 ^a
	4	1	6,15 ^a	16,10 ^a	9,95 ^a	2,43 ^a	16,10 ^a	14,08 ^a	1,40 ^a	16,10 ^a	15,30 ^a
		2	4,85 ^a	16,10 ^a	11,25 ^a	2,18 ^a	16,10 ^a	14,63 ^a	2,05 ^a	16,10 ^a	14,05 ^a

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras iguais nas colunas, dentro de cada ano de safra e profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey adotado ($p > 0,05$). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

A comparação entre os anos de avaliação revelou alterações significativas na maioria das frações de carbono, evidenciando mudanças na dinâmica da matéria orgânica ao longo do período experimental, demonstrando dessa forma, a evolução na dinâmica da matéria orgânica entre os períodos avaliados (Figura 7).

Figura 7 – Teores médios das frações de carbono orgânico do solo (COM, COP e COT) nas safras de 2023 e 2025 em diferentes profundidades de amostragem.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: As barras representam a média dos dados para cada estratégia de inoculação em cada safra, e as barras de erro indicam o erro padrão da média. Letras diferentes entre colunas, para uma mesma variável e profundidade, indicam diferença estatística significativa entre os anos de safra pelo teste de comparação de médias ($p < 0,05$). COP: Carbono Orgânico Particulado; COT: Carbono Orgânico Total; COM: Carbono Orgânico Mineral.

Na profundidade de 0,00-0,10 m, houve incremento substancial no COP em 2025, refletindo o acúmulo de palhada sob sistema plantio direto (Singh *et al.*, 2025) em contraste com a redução do COM no mesmo período (Figura 7).

O COT, por sua vez, permaneceu estável entre os ciclos para a camada superficial. Este fenômeno sugere uma via de estabilização mediada pela

estabilização de matéria orgânica dissolvida e subprodutos microbianos (necromassa) nas camadas superficiais (Zhang *et al.*, 2021; Niu *et al.*, 2024).

A literatura aponta que microrganismos inoculados no solo, podem aumentar a eficiência do uso do carbono, convertendo resíduos em biomassa microbiana em vez de CO₂ (Li *et al.*, 2024). Essa necromassa é um precursor fundamental para a formação do COM, que se liga quimicamente às argilas e óxidos, encontrando proteção contra a degradação (Niu *et al.*, 2024). Assim, o aumento do COM de 0,10-0,40 m em 2025 indica que o carbono processado na superfície está sendo mobilizado e estabilizado no perfil edáfico, passo essencial para o sequestro de carbono a longo prazo (Zhang *et al.*, 2021).

Nas camadas subsuperficiais (0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m), o comportamento predominante foi de acúmulo com aumento significativo nos teores médios de COT e COM em 2025 em ambas as profundidades (Figura 7). Quanto ao COP, embora tenha ocorrido incremento na camada de 0,10-0,20 m, registrou-se redução significativa na profundidade de 0,20-0,40 m, entre as safras.

Em suma, os dados sugerem que, para além dos efeitos das inoculações testadas individualmente, o fator tempo/safra promoveu redistribuição e aporte de carbono no perfil do solo. Observou-se uma tendência de elevação das frações mais estáveis (COM) e do carbono total (COT) em profundidade no último ano de avaliação (Figura 7).

7.1.4 Fertilidade do solo

Os atributos químicos do solo ao final da safra 2022/2023 exibiram variações significativas em função das estratégias de inoculação com *A. brasilense* e *Bradyrhizobium elkanii*, com respostas mais acentuadas na camada superficial (0,00–0,10 m). Nesta profundidade, o fósforo (P) disponível apresentou incrementos de 15 a 28% nos tratamentos inoculados em relação ao controle. Os maiores teores ocorreram sob a Inoculação de *Bradyrhizobium* na semente e *Azospirillum* no sulco de semeadura (64 mg dm⁻³) e 4, que superaram estatisticamente o tratamento controle, em ausência de inoculação adicional (Tabela 7). Esses aumentos significativos ocorreram em virtude dos efeitos da inoculação em solos tropicais, onde

Silva *et al.* (2024) demonstraram que a inoculação de sementes com *A. brasilense*, combinada com cobertura vegetal, elevou significativamente o teor de P do solo.

Quanto à MO houve incrementos na camada de 0,00–0,10 m, com valor de 31,75 g dm⁻³ na inoculação de *Bradyrhizobium* na semente e *Azospirillum* no sulco de semeadura (Tabela 7). No ciclo de 2025, o efeito foi ainda mais expressivo, sendo todos os tratamentos situando-se entre 26 e 29,25 g dm⁻³ (Tabela 8) sem diferenças significativas. Tais resultados refletem o estímulo ao crescimento vegetal e à atividade microbiana. Silva *et al.* (2024) reportaram que a inoculação com *A. brasilense* aumentou a MO e protegeu microrganismos benéficos. Este cenário é complementado por Easwaran *et al.* (2023), que destacam a importância do manejo integrado de nutrientes para a saúde do solo e manutenção do carbono orgânico, corroborado também por Alves *et al.* (2025), que reforçaram que o uso de microrganismos associados a fertilizantes orgânicos é uma abordagem eficaz para melhorar a qualidade da fertilidade do solo.

Este acúmulo de palhada pode ser explicado pelo aumento da produção de biomassa vegetal via fixação biológica de nitrogênio e produção de fitohormônios por *Azospirillum* e *Bradyrhizobium* (Kasu-Bandi *et al.*, 2019; Antony *et al.*, 2020; Galindo *et al.*, 2021). Também, Hridya, Byju e Misra (2014) demonstraram que a inoculação aumenta o carbono da biomassa microbiana e a atividade enzimática, acelerando a ciclagem da MO. O estímulo à colonização por fungos micorrízicos arbusculares também contribui para a produção de glomalina, estabilizando a matéria orgânica no solo (Silva *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024).

A concentração desses efeitos na camada superficial (0,00–0,10 m) é consistente com a literatura, que aponta ser esta a zona de máxima densidade radicular e interação microbiana (Ramalakshmi; Iniyakumar; Raj, 2008; Hridya; Byju; Misra, 2014; Silva *et al.*, 2024). Ribeiro *et al.* (2025) reforçam que a inoculação em sistema plantio direto aumenta os valores de bioindicadores do solo, impactando positivamente a MO.

Na camada de 0,00–0,10 m, o tratamento destaque foi a *Bradyrhizobium* inoculada nas sementes e a *Azospirillum* aplicada no sulco de semeadura. As Inoculações 3 e 4 resultaram em maiores valores de pH e cálcio (Ca) SB (107 mmol_c dm⁻³) e CTC (122,1 mmol_c dm⁻³), na presença da inoculação adicional (Tabela 7). Esses aumentos são consistentes com o trabalho de Silva *et al.* (2024), onde a coinoculação gerou aumentos na SB e CTC em LATOSSOLO VERMELHO.

A inoculação eleva a CTC dependente de pH ao aumentar os teores de MO, promovendo a retenção de cátions (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^{+}). Também Kasu-Bandi *et al.* (2019) observaram que a inoculação com *Bradyrhizobium* em Ferralsols aumentou o pH e a CTC na camada superficial. Embora, Galindo *et al.* (2017) indicaram que a maior extração de nutrientes por plantas inoculadas possa reduzir a CTC temporariamente, o efeito de mitigação da acidificação e o acúmulo de MO (aumento do poder tampão) compensou essa tendência, contribuindo para a sustentabilidade em solos tropicais (Alves *et al.*, 2025).

Os mecanismos que levam ao aumento do pH são pela via de produção de bases orgânicas e a complexação do alumínio por ácidos orgânicos produzidos por microrganismos (Antony *et al.*, 2020; Galindo *et al.*, 2021). Outros estudos de Galindo *et al.* (2017) demonstraram que *A. brasilense* reduziu a acidificação do solo, enquanto Kasu-Bandi *et al.* (2019) notaram aumento do pH com *Bradyrhizobium*.

Em contrapartida, os maiores teores de acidez potencial (H+Al) foram registrados na Inoculação 1 (controle, sem inoculação). Para os teores de Alumínio (Al) e Saturação por Alumínio (m%), não foram observados impactos por parte do tipo de manejo biológico adotado. Além disso, o Potássio (K), Mg (Magnésio) e o Enxofre (S) foram atributos destaque em condições de ausência de inoculação adicional nos tratamentos 4, 3 e 2, respectivamente. Os tratamentos 3 e 4 demonstraram as maiores médias na V%, independentemente se houve inoculação adicional ou não (Tabela 7).

Na camada de 0,10-0,20 m, o efeito das estratégias de inoculação foi menos pronunciado para o P e a MO, que não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Entretanto, o pH apresentou valores mais elevados na Inoculação 3 (6,05 a 6,08), diferenciando-se da Inoculação 1 (4,78 a 5,05). A Saturação por Bases (V%) e a Saturação por Alumínio (m%) mostraram comportamentos inversos: os maiores valores de V% foram observados na Inoculação 3 (até 75,5%), enquanto a Inoculação 1 apresentou a maior saturação por alumínio (8,75%). O teor de S foi significativamente maior na Inoculação 1 (32,5 a 35,75 mg dm^{-3}) em relação aos demais tratamentos nesta profundidade. As bases trocáveis do solo que se destacaram foram, o tratamento 4 no K, tratamento 3 no Ca e Mg (sem inoculação adicional), e em resposta, à SB foi destaque nos tratamentos 3 e 4, com ausência ou presença da inoculação adicional. A Al e H+Al, tiveram resultados semelhantes, sendo o tratamento controle com maiores médias, enquanto que o tratamento 3, sem inoculação adicional afetou positivamente na CTC.

Na camada de 0,20-0,40 m, a maioria dos parâmetros tendeu à uniformidade, indicando uma menor influência das estratégias de inoculação em profundidade no curto prazo. No entanto, o pH e o Al mantiveram variações significativas; a Inoculação 3 apresentou o pH com maior média (5,95) e, os maiores teores de Al ($4,25 \text{ mmol}_e \text{ dm}^{-3}$), m% (10,75%), S ($45,5 \text{ mmol}_e \text{ dm}^{-3}$) e H+Al ($35,2 \text{ mmol}_e \text{ dm}^{-3}$) foram verificados no tratamento controle. Os teores de P foram superiores na Inoculação 3, associada à inoculação adicional ($30,5 \text{ mg dm}^{-3}$), quando comparados à Inoculação 4, com inoculação adicional ($16,75 \text{ mg dm}^{-3}$). O teor de K foi significativo no tratamento 4, com inoculação adicional. Os demais macronutrientes (Ca, Mg), MO, CTC, SB e V% não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as estratégias de manejo nesta profundidade (Tabela 7).

Na safra de 2025, não houve disparidades estatísticas ($p > 0,05$), de todos os atributos avaliados em conjunto com os manejos adotados na camada superficial do solo. Em virtude das sucessivas inoculações que ocorreram, houve efeito acumulativo, porém, as variações tornaram-se mais evidentes em subsuperfície. Na camada superficial (0,00–0,10 m), o P disponível apresentou incrementos de 32 a 45% em relação ao controle, com valores entre $49,50$ e $75,25 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 8), enquanto a MO situou-se na faixa de 26 a $29,25 \text{ g dm}^{-3}$. Os mecanismos biológicos por trás dessa dinâmica podem ter sido sinérgicos. Hafez, Popov e Rashad (2019) identificaram bactérias solubilizadoras de fosfato e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) como agentes promotores da disponibilidade de P.

Além disso, a solubilização ocorre pela produção de ácidos orgânicos e enzimas fosfatases que convertem formas não-lábeis de P em formas disponíveis (Kasu-Bandi *et al.*, 2019; Fituma; Tana; Argaw, 2018). Segundo Hasan (2018), a inoculação com *Rhizobium*, associada à adubação fosfatada, altera positivamente as propriedades físico-químicas do solo cultivado com leguminosas. Adicionalmente, Araújo *et al.* (2018) observaram que a coinoculação potencializa esses mecanismos no solo, enquanto Fituma *et al.* (2018) indicam que a melhoria da função radicular mobiliza mais P das reservas do solo para a biomassa.

Nesta camada superficial, o pH manteve-se próximo à neutralidade (5,85 a 6,23), resultando em nulidade de Al trocável e m% (Tabela 8). A ausência da diferença na saturação por alumínio (m%) foi um dos efeitos mais significativos. Em 2025, a Inoculação 1 manteve m% superior (17 a 18,75% em profundidade), enquanto os tratamentos com Inoculação 2 e 3 reduziram esse valor a 0% na camada de 0,20–

0,40 m (Tabela 8), sinalizando um ambiente propício ao desenvolvimento radicular profundo. A toxicidade por alumínio é limitante em solos ácidos, e sua redução via inoculação é uma estratégia promissora (Galindo *et al.*, 2017; Kasu-Bandi *et al.*, 2019; Galindo *et al.*, 2021). O efeito cumulativo na safra 2025 sugere que a prática repetida mantém os benefícios sobre a química do alumínio, pelo efeito de complexação por ácidos orgânicos.

A CTC e a V% conservaram valores elevados, com esta última variando entre 76,50% e 83,75%. A SB, as bases trocáveis (K, Ca e Mg), a H+Al e o S também apresentaram estabilidade química em superfície.

Na camada de 0,10-0,20 m, o P respondeu de forma diferenciada, com a *Bradyrhizobium* inoculado na semente e *Azospirillum* no sulco de semeadura sem a inoculação adicional registrando o maior teor ($69,75 \text{ mg dm}^{-3}$) frente ao menor valor observado na inoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* em conjunto na semente, sob inoculação adicional ($26,25 \text{ mg dm}^{-3}$). Embora MO, pH, K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, S, CTC e V% tenham permanecido estáveis, detectou-se acidez trocável, sendo a ausência de inoculação apresentou o maior índice de m% (14,75%), superando as inoculações de *Bradyrhizobium* na semente, com inoculação adicional e *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* inoculadas juntas na semente, sem inoculação adicional, onde o Al foi inexistente.

Na profundidade de 0,20-0,40 m, as estratégias de manejo não influenciaram significativamente os macronutrientes ou o complexo de troca, exceto o Al, a acidez potencial (H⁺Al) e a saturação por alumínio (m%). O H+Al variou entre 22,75 e 37,25 mmol_c dm⁻³. A m% foi estatisticamente superior na ausência de Inoculação (controle) (17% a 18,75%), ao passo que os tratamentos de inoculação de *Bradyrhizobium* inoculado na semente e a *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* inoculadas juntas na semente, sem inoculação adicional, mantiveram este índice em 0%, indicando um ambiente químico mais propício ao desenvolvimento radicular profundo sob tais condições (Tabela 8).

Tabela 6 – Atributos químicos do solo (macro e micronutrientes) em três profundidades de amostragem, coletados antes da instalação experimental. Selvíria- MS, 2022.

Fertilidade do solo em três profundidades – Caracterização da área																
Prof. (m)	Aspectos químicos do solo (macro e micronutrientes)															
	P	MO	pH	-----mmol _c dm ⁻³ -----						%	-----mg dm ⁻³ -----					
	mgdm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn
0,00-0,10	65	37	6,3	3,8	81	34	16	0	118,8	134,8	88	0,18	2,7	20	27,1	3,3
0,10-0,20	53	21	5,8	1,9	34	23	25	0	58,9	83,9	70	0,12	3,6	26	25,5	1,4
0,20-0,40	47	17	5,4	1,2	24	22	28	0	47,2	75,2	63	0,14	3,4	28	25,6	1,1

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: P resina: Fósforo, M.O.: matéria orgânica, pH: potencial hidrogeniônico, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio, H+Al: acidez potencial, Al: alumínio, SB: soma de bases, CTC: capacidade de troca catiônica, V: saturação por bases, B: boro, Cu: cobre, Fe: ferro, Mn: manganês, Zn: zinco.

Tabela 7 – Atributos químicos do solo em três profundidades de amostragem (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) sob diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional na safra 2022/23.

Fertilidade do solo na safra de 2023															
Prof.	Inoc.	F.I.A.	Aspectos químicos do solo												
			P	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	S	CTC	V%	m%
0,00-0,10m	1	1	28 ^b	24,3 ^{ab}	5,53 ^c	2,5 ^{bc}	27 ^c	24 ^d	27,3 ^a	0,0 ^a	53,5 ^c	24,7 ^{abc}	80,8 ^c	65,7 ^b	0,0 ^a
		2	48 ^{ab}	24,7 ^{ab}	5,60 ^c	2,8 ^{bc}	29 ^c	27 ^{cd}	27,3 ^a	0,0 ^a	58,8 ^c	26,5 ^{abc}	86,0 ^c	68,0 ^b	0,0 ^a
	2	1	43 ^{ab}	22,5 ^b	5,88 ^{abc}	2,6 ^{bc}	41 ^{bc}	29 ^{bcd}	20,0 ^{ab}	0,0 ^a	73,6 ^{bc}	27,0 ^{ab}	93,6 ^{bc}	78,5 ^{ab}	0,0 ^a
		2	44 ^{ab}	21,7 ^b	5,83 ^{bc}	1,9 ^c	35 ^c	27 ^{cd}	22,7 ^{ab}	0,0 ^a	63,9 ^c	30,7 ^a	86,6 ^c	73,5 ^{ab}	0,0 ^a
	3	1	64 ^a	30,0 ^a	6,43 ^{ab}	2,9 ^{bc}	51 ^{ab}	38 ^{ab}	15,5 ^b	0,0 ^a	89,0 ^{ab}	9,3 ^{bc}	105,9 ^{ab}	86,5 ^a	0,0 ^a
		2	60 ^a	31,7 ^a	6,50 ^a	2,9 ^{bc}	63 ^a	41 ^a	15,5 ^b	0,0 ^a	107,0 ^a	9,8 ^{bc}	122,1 ^a	87,0 ^a	0,0 ^a
	4	1	56 ^a	25,5 ^{ab}	6,38 ^{ab}	4,2 ^{ab}	53 ^{ab}	34 ^{abcd}	16,7 ^b	0,0 ^a	91,4 ^{ab}	7,5 ^c	108,2 ^{ab}	84,7 ^a	0,0 ^a
		2	51 ^a	27,5 ^{ab}	6,40 ^{ab}	4,7 ^a	52 ^{ab}	35 ^{abc}	17,0 ^b	0,0 ^a	91,3 ^{ab}	9,0 ^{bc}	108,3 ^{ab}	84,2 ^a	0,0 ^a
0,10-0,20m	1	1	34 ^a	18,2 ^a	5,05 ^{bc}	1,7 ^b	14 ^{bc}	15 ^{bc}	38,5 ^a	3,0 ^a	32,7 ^{bc}	32,5 ^a	71,2 ^{ab}	46,3 ^{bc}	8,7 ^a
		2	34 ^a	17,5 ^a	4,78 ^c	1,5 ^b	15 ^c	14 ^c	37,3 ^a	3,0 ^a	31,0 ^c	35,7 ^a	64,3 ^b	41,5 ^c	8,7 ^a
	2	1	46 ^a	19,5 ^a	5,55 ^{abc}	2,1 ^{ab}	28 ^{ab}	22 ^{ab}	25,3 ^b	0,0 ^b	52,3 ^{ab}	22,0 ^{ab}	77,6 ^{ab}	67,5 ^a	0,0 ^b
		2	32 ^a	18,7 ^a	5,43 ^{abc}	1,7 ^b	24 ^{abc}	19 ^{abc}	27,3 ^b	0,5 ^b	44,7 ^{abc}	24,5 ^a	71,9 ^{ab}	61,5 ^{ab}	1,5 ^b
	3	1	39 ^a	19,5 ^a	6,05 ^a	1,5 ^b	27 ^{abc}	22 ^{ab}	20,7 ^b	0,0 ^b	49,9 ^{abc}	8,7 ^b	74,2 ^{ab}	73,5 ^a	0,0 ^b
		2	48 ^a	19,7 ^a	6,08 ^a	1,6 ^b	34 ^a	26 ^a	20,0 ^b	0,0 ^b	61,2 ^a	10,3 ^b	83,8 ^a	75,5 ^a	0,0 ^b
	4	1	31 ^a	19,5 ^a	5,75 ^{ab}	2,6 ^a	28 ^{abc}	22 ^{ab}	24,0 ^b	0,0 ^b	52,6 ^a	8,3 ^b	76,6 ^{ab}	68,0 ^a	0,0 ^b
		2	28 ^a	20,2 ^a	5,58 ^{abc}	2,5 ^a	24 ^{abc}	20 ^{abc}	26,5 ^b	0,0 ^b	46,5 ^{abc}	9,5 ^b	73,1 ^{ab}	63,3 ^a	0,0 ^b
0,20-0,40m	1	1	24 ^{ab}	17,2 ^a	4,90 ^{ab}	1,5 ^{abc}	14 ^a	12 ^a	35,3 ^a	3,3 ^{ab}	27,7 ^a	41,7 ^a	63,0 ^a	44,0 ^a	10,7 ^a
		2	24 ^{ab}	16,5 ^a	4,83 ^b	1,4 ^{abc}	12 ^a	11 ^a	34,5 ^a	4,5 ^a	25,2 ^a	45,5 ^a	59,7 ^a	41,7 ^a	10,75 ^a
	2	1	25 ^{ab}	16,5 ^a	5,38 ^{ab}	1,7 ^{abc}	21 ^a	18 ^a	28,0 ^{ab}	0,0 ^b	40,4 ^a	21,3 ^b	68,4 ^a	58,7 ^a	0,0 ^b
		2	22 ^{ab}	16,5 ^a	5,3 ^{ab}	1,5 ^{abc}	19 ^a	15 ^a	29,5 ^{ab}	0,0 ^b	34,7 ^a	27,3 ^{ab}	64,2 ^a	54,0 ^a	0,0 ^b
	3	1	23 ^{ab}	17,7 ^a	5,95 ^a	1,4 ^{bc}	23 ^a	19 ^a	25,3 ^{ab}	0,0 ^b	43,4 ^a	7,3 ^b	68,7 ^a	61,0 ^a	0,0 ^b
		2	30 ^a	17,5 ^a	5,83 ^{ab}	1,3 ^c	23 ^a	20 ^a	21,8 ^b	1,5 ^{ab}	44,9 ^a	18,0 ^b	69,6 ^a	61,0 ^a	4,7 ^{ab}
	4	1	22 ^{ab}	17,7 ^a	5,43 ^{ab}	1,8 ^a	20 ^a	17 ^a	26,7 ^{ab}	0,0 ^b	39,1 ^a	13,5 ^b	65,8 ^a	57,7 ^a	0,0 ^b
		2	17 ^b	17,5 ^a	5,25 ^{ab}	1,7 ^{ab}	15 ^a	14 ^a	29,5 ^{ab}	2,0 ^{ab}	31,2 ^a	14,7 ^b	60,7 ^a	50,0 ^a	8,0 ^{ab}

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: F.I.A = Fator de Inoculação Adicional. Médias seguidas por letras iguais nas colunas, dentro de cada profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey adotado ($p > 0,05$). P: Fósforo (mg/dm³); MO: Matéria Orgânica (g/dm³); pH: acidez ativa em CaCl₂; K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, CTC: teores de Potássio, Cálcio, Magnésio, Acidez Potencial, Alumínio

trocável, Soma de Bases e Capacidade de Troca Catiônica, respectivamente ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); S: Enxofre (mg dm^{-3}); V: Saturação por bases (%); m: Saturação por alumínio (%). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

Tabela 8 – Atributos químicos do solo em três profundidades de amostragem (0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) sob diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional na safra 2024/2025.

(Continua)

Fertilidade do solo na safra de 2025															
Prof.	Inoc.	F.I.A.	Aspectos químicos do solo (macro e micronutrientes)												
			P	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	S	CTC	V	m
0,00-0,10 m	1	1	58 ^a	28 ^a	5,85 ^a	2,45 ^a	46,0 ^a	25,75 ^a	20,25 ^a	0,0 ^a	74,20 ^a	17,00 ^a	94,45 ^a	78,25 ^a	0,00 ^a
		2	62 ^a	29,3 ^a	5,85 ^a	3,13 ^a	43,7 ^a	24,25 ^a	20,25 ^a	0,0 ^a	71,13 ^a	18,25 ^a	91,38 ^a	77,75 ^a	0,00 ^a
	2	1	65 ^a	29,3 ^a	6,18 ^a	2,73 ^a	57,25 ^a	27,25 ^a	16,50 ^a	0,0 ^a	87,23 ^a	17,75 ^a	103,73 ^a	82,50 ^a	0,00 ^a
		2	75 ^a	26,3 ^a	6,23 ^a	2,63 ^a	52,25 ^a	26,00 ^a	17,00 ^a	0,0 ^a	80,88 ^a	16,75 ^a	97,88 ^a	82,25 ^a	0,00 ^a
	3	1	75 ^a	28,0 ^a	6,13 ^a	1,95 ^a	58,50 ^a	27,25 ^a	19,25 ^a	0,0 ^a	87,7 ^a	13,00 ^a	106,95 ^a	79,25 ^a	0,00 ^a
		2	59 ^a	28,0 ^a	6,15 ^a	2,03 ^a	44,75 ^a	24,50 ^a	19,25 ^a	0,0 ^a	71,28 ^a	13,25 ^a	90,53 ^a	76,50 ^a	0,00 ^a
	4	1	52 ^a	28,0 ^a	6,13 ^a	2,78 ^a	53,75 ^a	28,50 ^a	16,50 ^a	0,0 ^a	85,03 ^a	17,00 ^a	101,53 ^a	83,75 ^a	0,00 ^a
		2	49 ^a	26,0 ^a	5,85 ^a	2,70 ^a	46,25 ^a	25,50 ^a	20,50 ^a	0,0 ^a	74,45 ^a	20,00 ^a	94,95 ^a	77,25 ^a	0,00 ^a
0,10-0,20 m	1	1	33 ^{ab}	21,0 ^a	4,83 ^a	1,78 ^a	16,5 ^a	10,25 ^a	32,00 ^a	4,50 ^a	28,53 ^a	41,00 ^a	60,53 ^a	46,75 ^a	14,75 ^a
		2	40 ^{ab}	18,2 ^a	4,93 ^a	1,83 ^a	15,75 ^a	10,75 ^a	31,75 ^a	3,25 ^a	28,33 ^a	38,00 ^a	60,08 ^a	47,25 ^a	10,50 ^a
	2	1	70 ^a	19,5 ^a	5,35 ^a	1,65 ^a	24,00 ^a	13,50 ^a	27,25 ^a	1,75 ^a	39,15 ^a	26,00 ^a	66,40 ^a	59,00 ^a	3,00 ^b
		2	49 ^{ab}	18,2 ^a	5,18 ^a	1,53 ^a	18,75 ^a	11,50 ^a	29,75 ^a	0,00 ^a	31,78 ^a	35,75 ^a	61,53 ^a	51,50 ^a	0,00 ^b
	3	1	51 ^{ab}	18,0 ^a	5,83 ^a	1,15 ^a	30,50 ^a	18,75 ^a	22,75 ^a	1,00 ^a	50,40 ^a	17,75 ^a	73,15 ^a	65,50 ^a	3,00 ^b
		2	47 ^{ab}	17,0 ^a	5,75 ^a	1,20 ^a	28,25 ^a	18,00 ^a	23,50 ^a	1,75 ^a	47,45 ^a	22,50 ^a	70,95 ^a	62,00 ^a	6,25 ^{ab}
	4	1	44 ^{ab}	18,2 ^a	5,5 ^a	1,98 ^a	20,00 ^a	14,50 ^a	25,75 ^a	0,00 ^a	36,48 ^a	20,25 ^a	62,23 ^a	58,25 ^a	0,00 ^b
		2	26 ^b	18,7 ^a	5,18 ^a	1,55 ^a	18,00 ^a	13,25 ^a	29,50 ^a	3,00 ^a	32,80 ^a	31,00 ^a	62,30 ^a	51,00 ^a	11,50 ^a
0,20-0,40 m	1	1	23 ^a	18,5 ^a	4,93 ^a	1,28 ^a	15,25 ^a	10,00 ^a	36,50 ^{ab}	5,00 ^a	26,53 ^a	50,75 ^a	63,03 ^a	41,75 ^a	17,00 ^{ab}
		2	17 ^a	18,5 ^a	4,88 ^a	1,45 ^a	13,25 ^a	9,00 ^a	37,25 ^a	5,25 ^a	23,70 ^a	58,25 ^a	60,95 ^a	38,75 ^a	18,75 ^a
	2	1	27 ^a	18,0 ^a	5,25 ^a	1,38 ^a	17,75 ^a	11,75 ^a	29,50 ^{abc}	0,00 ^b	30,88 ^a	53,00 ^a	60,38 ^a	51,00 ^a	0,00 ^b
		2	25 ^a	20,2 ^a	5,20 ^a	1,48 ^a	16,00 ^a	10,75 ^a	31,75 ^{abc}	0,00 ^b	28,23 ^a	72,75 ^a	59,98 ^a	47,00 ^a	0,00 ^b
	3	1	34 ^a	17,5 ^a	5,90 ^a	1,25 ^a	36,50 ^a	19,00 ^a	22,75 ^c	1,25 ^{ab}	56,75 ^a	37,75 ^a	79,50 ^a	63,25 ^a	5,00 ^{ab}
		2	33 ^a	18,0 ^a	5,85 ^a	1,28 ^a	30,00 ^a	19,50 ^a	23,25 ^{bc}	1,75 ^{ab}	50,78 ^a	47,00 ^a	74,03 ^a	62,00 ^a	7,25 ^{ab}

Fertilidade do solo na safra de 2025															
Prof.	Inoc.	F.I.A.	Aspectos químicos do solo (macro e micronutrientes)												
			P	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	S	CTC	V	m
	4	1	18 ^a	17,5 ^a	5,33 ^a	1,38 ^a	15,50 ^a	13,25 ^a	28,00 ^{abc}	2,00 ^{ab}	30,13 ^a	41,25 ^a	58,13 ^a	51,25 ^a	8,00 ^{ab}
		2	17 ^a	18,3 ^a	5,13 ^a	1,68 ^a	12,75 ^a	10,50 ^a	32,00 ^{abc}	3,25 ^{ab}	24,93 ^a	54,50 ^a	56,93 ^a	43,00 ^a	14,00 ^{ab}

(Conclusão)

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras iguais nas colunas, dentro de cada profundidade, não diferem entre si pelo teste de Tukey adotado ($p > 0,05$). P: Fósforo (mg/dm^3); MO: Matéria Orgânica (g/dm^3); pH: acidez ativa em CaCl_2 ; K, Ca, Mg, H+Al, Al, SB, CTC: teores de Potássio, Cálcio, Magnésio, Acidez Potencial, Alumínio trocável, Soma de Bases e Capacidade de Troca Catiônica, respectivamente ($\text{mmol}_c \text{ dm}^3$); S: Enxofre (mg dm^3); V: Saturação por bases (%); m: Saturação por alumínio (%). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional (F.I.A): sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

7.1.5 Físicas do solo

A análise dos atributos físicos revelou perfil com baixa estabilidade estrutural, indicando que o solo está com densidade relativamente elevada para um LATOSSOLO de textura argilosa (Tabela 9).

Não foram observadas variações significativas entre as diferentes formas de inoculação e inoculação adicional para a densidade do solo (ou aparente), ou seja, todas as intervenções biológicas nos anos de 2023, 2024 e 2025 mantiveram a homogeneidade ao longo do perfil.

Os valores de densidade observados na profundidade de 0,00-0,10 m, situaram-se entre 1,35 e 1,50 g cm⁻³ (Tabela 9), obtendo-se um aumento na compactação do solo, em todos os tratamentos, ou seja, houve aumento da densidade do solo resultando em um decréscimo na qualidade estrutural.

Embora os valores de densidade se aproximem do limite superior para solos argilosos, a uniformidade observada nas demais profundidades (0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) demonstram que, todos os tipos de manejo biológico adotado em ambas safras, foram estatisticamente similares ao observado na superfície e preservaram a estrutura consolidada, com evidências de compactação adicional provocado pelo manejo (Tabela 9).

Em sistemas tropicais, os limites críticos variam substancialmente de acordo com a classe textural, e os valores aproximados de 1,66 g cm⁻³ para solos franco-arenosos e 1,52 g cm⁻³ para solos francos. Para LATOSSOLOS de textura argilosa, predominantes na área do presente estudo, os limiares são ainda mais restritivos, situando-se entre 1,39 e 1,42 kg dm⁻³ (Ramos *et al.*, 2015; Suzuki *et al.*, 2022). Essa faixa demanda uma interpretação criteriosa à luz dos limites críticos estabelecidos para solos tropicais. A densidade aparente é um indicador fundamental da qualidade física, influenciando diretamente a resistência mecânica à penetração radicular, a aeração e a dinâmica hídrica do perfil (Vendruscolo; Mesa; Missio, 2023).

A ausência de diferenças entre os tratamentos com inoculação e o controle indica que as estratégias de inoculação não promoveram alterações detectáveis nos atributos físicos avaliados do solo no curto e médio prazo. Na ciência do solo, reconhece-se que alterações consistentes na densidade ou porosidade total via microrganismos ocorrem preferencialmente em escalas temporais longas, mediadas por processos como a produção de exopolissacarídeos e a modificação da arquitetura

radicular na rizosfera. As transições para benefícios estruturais visíveis geralmente requerem o aporte contínuo de biomassa via plantas de cobertura e a estabilização da matéria orgânica (Pereira *et al.*, 2010; Moreira *et al.*, 2014).

Tabela 9 – Atributos físicos do solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade) em três profundidades de amostragem, sob diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional no ano de 2025.

Análises Físicas do solo em função da inoculação e inoculação adicional						
Prof. (m)	Inoculação	Fator de Inoculação Adicional	Parâmetros			
			Macro	Micro	Total	Densidade
0,00-0,10	1	1	9,95 ^{aa}	37,80 ^{aa}	47,73 ^{aa}	1,40 ^{aa}
		2	10,60 ^{aa}	35,78 ^{aa}	46,38 ^{aa}	1,35 ^{aa}
	2	1	8,80 ^{aa}	35,28 ^{aa}	44,08 ^{aa}	1,48 ^{aa}
		2	10,00 ^{aa}	36,88 ^{aa}	45,83 ^{aa}	1,38 ^{aa}
	3	1	9,98 ^{aa}	36,93 ^{aa}	45,85 ^{aa}	1,40 ^{aa}
		2	9,08 ^{aa}	34,93 ^{aa}	44,00 ^{aa}	1,50 ^{aa}
	4	1	10,08 ^{aa}	35,10 ^{aa}	45,18 ^{aa}	1,50 ^{aa}
		2	10,45 ^{aa}	36,18 ^{aa}	46,60 ^{aa}	1,43 ^{aa}
0,10-0,20	1	1	9,88 ^{aa}	32,75 ^{ab}	42,65 ^{aa}	1,48 ^{aa}
		2	11,08 ^{aa}	32,40 ^{ab}	43,43 ^{aa}	1,45 ^{aa}
	2	1	9,48 ^{aa}	34,08 ^{aa}	43,55 ^{aa}	1,53 ^{aa}
		2	8,93 ^{aa}	33,95 ^{aa}	42,85 ^{aa}	1,45 ^{aa}
	3	1	8,80 ^{ab}	33,78 ^{aa}	42,58 ^{aa}	1,48 ^{aa}
		2	9,15 ^{aa}	35,20 ^{aa}	44,35 ^{aa}	1,45 ^{aa}
	4	1	10,00 ^{aa}	34,75 ^{aa}	44,78 ^{aa}	1,50 ^{aa}
		2	9,63 ^{aa}	36,50 ^{aa}	46,15 ^{aa}	1,43 ^{aa}
0,20-0,40	1	1	10,70 ^{aa}	35,60 ^{aa}	46,28 ^{aa}	1,35 ^{aa}
		2	11,40 ^{aa}	34,03 ^{aa}	45,45 ^{aa}	1,40 ^{aa}
	2	1	10,18 ^{aa}	35,73 ^{aa}	45,90 ^{aa}	1,43 ^{aa}
		2	9,35 ^{aa}	36,70 ^{aa}	46,05 ^{aa}	1,40 ^{aa}
	3	1	10,80 ^{aa}	38,15 ^{aa}	48,98 ^{aa}	1,35 ^{aa}
		2	9,25 ^{aa}	36,83 ^{aa}	46,08 ^{aa}	1,40 ^{aa}
	4	1	9,10 ^{aa}	37,55 ^{aa}	46,68 ^{aa}	1,43 ^{aa}
		2	10,08 ^{aa}	37,68 ^{aa}	47,78 ^{aa}	1,38 ^{aa}

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha (comparando tratamentos dentro da mesma profundidade) e letras maiúsculas iguais na coluna (comparando a mesma variável entre diferentes profundidades) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Macro: Macroporosidade (%); Micro: Microporosidade (%); Total: Porosidade Total (%); Densidade: Densidade do solo (kg dm^{-3}). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-

Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional (F.I.A): sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

Portanto, a ausência de alterações nos atributos físicos do solo indica que, nas condições do presente estudo, as estratégias de inoculação não exerceram influência detectável sobre a estrutura física do solo durante o período avaliado, a estabilidade física observada, validando o uso da biotecnologia como uma prática segura, os benefícios dos inoculantes, amplamente documentados na esfera bioquímica e fisiológica, não ocorrem à custa da degradação da relação massa/volume ou da configuração porosa original em sistema plantio direto consolidado (Pereira *et al.*, 2010; Moreira *et al.*, 2014).

A porosidade total, na camada superficial do solo, não apresentou diferenças entre os tratamentos e manteve valores aproximados de 45% (Tabela 9), representando um valor intermediário de poros, e dependente da distribuição entre macroporos e microporos (De Moraes *et al.*, 2020).

Observou-se que na camada subsuperficial (0,10-0,20 m) o tratamento 3.1 demonstrou média igual aos demais.

A análise da distribuição dos poros, revelou uma predominância da microporosidade na superfície do solo da área experimental, com valores variando de 32 a 38 m³ m⁻³ (Tabela 9), garantindo a retenção hídrica adequada ao sistema, sem comprometer a aeração superficial. Fisicamente, essa condição reflete uma estrutura de agregados estáveis, característica de solos oxídicos altamente intemperizados, onde a mineralogia e o manejo conservacionista favorecem a formação de microagregados estáveis (Pereira *et al.*, 2010; Ramos *et al.*, 2015).

Quanto aos macroporos, na camada de 0,00-0,10 m, não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Esse resultado sugere que os poros de aeração operam de forma autônoma, preservando a funcionalidade física do solo sob manejo biológico (Ramos *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2022). Na camada de 0,10-0,20 m, o tratamento 3.1 mostrou a menor média dentre as demais.

Nota-se que na camada mais profunda (0,20-0,40 m) para macro, microporo e porosidade total, os tratamentos não apresentaram diferenças significativas. É relevante ressaltar que ao longo dos anos do período experimental, houve rotação/sucessão de culturas na área com presença da soja, sorgo e os capins que

promoveram a homogeneização do sistema, além do SPD ser consolidado e estar presente na área há 14 anos, pode ter impactado na densidade do solo, frente ao resultado da análise, é possível esta faixa de compactação estar no início de um prejuízo agronômico. O sistema radicular profundo e vigoroso das gramíneas (Poaceae), favorece a qualidade estrutural do solo, por meio da agregação e permeabilidade (Torres *et al.*, 2022) e além disso, a deposição de restos culturais provenientes do SPD na superfície do solo aliado à rotação de culturas promove efeitos positivos nos atributos físico-químicos e biológicos no solo (Mazetto Júnior *et al.*, 2019).

7.1.6 Considerações finais

A qualidade do solo, sob a perspectiva dos resultados biológicos, enzimáticos e químico do solo ao longo das safras de 2022/23 até 2025, revelou que a saúde do solo foi impactada positivamente pela interação dos microrganismos e o aporte de resíduos provenientes do SPD consolidado.

As diferentes estratégias de inoculações promoveram acréscimo na atividade biológica na safra 2025, com incrementos em todos os tratamentos avaliados, além do aumento na mineralização de nutrientes (P e S).

Em relação à influência das inoculações sobre o carbono orgânico do solo foi mais evidente na fase inicial de implantação (safra de 2022/23). Com o decorrer do tempo, ocorreu uma evolução do sistema, sendo que o fator tempo e safra, promoveu a estabilização de frações mais estáveis como o COM e no incremento do COT, em profundidade. Essa situação evidencia que o manejo biológico favorece a translocação e a proteção físico-química do carbono no perfil do solo, que é fundamental para a sustentabilidade do sistema a médio e longo prazos.

A coinoculação de *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes e *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura, elevou os teores de fósforo disponível e matéria orgânica, além de aumentar a CTC e neutralizar a toxicidade por alumínio em camadas subsuperficiais do solo. Esse ambiente químico favorável cria melhores condições para o desenvolvimento radicular em camadas mais profundas, e a planta não encontrará limitações físicas para crescer no solo.

Apesar do solo apresentar sinais de compactação inerentes ao manejo histórico da área, os diferentes tipos de inoculações mantiveram a homogeneidade na parte

estrutural. A adição dos microrganismos no solo mostrou-se segura, não agravando a densidade ou alterando a porosidade total e a distribuição de poros.

Portanto, a inoculação e inoculação adicional atuaram como agente auxiliador na saúde do solo, potencializando a ciclagem de nutrientes e o estoque de carbono. Embora os benefícios estruturais do solo exijam maior tempo para se manifestarem de forma visível sobre a densidade do solo, e outros atributos físicos na integração desses microrganismos ao sistema de produção é uma estratégia eficaz para ter um ambiente produtivo resiliente e quimicamente fértil.

REFERÊNCIAS

- ALLISON, S. D. et al. Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function. In: **Soil enzymology**. Berlin: Springer, 2011. p. 229-243.
- ALLISON, S. D.; VITOUSEK, P. M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 5, p. 937-944, 2005.
- ALVES, R. S. et al. Regenerative Farming with Organic Fertilizer and Biologics: A New Approach to Enhancing Soybean Yield and Soil Chemical Quality. **Agriculture**, v. 15, n. 22, 2388, 2025. DOI: [10.3390/agriculture15222388](https://doi.org/10.3390/agriculture15222388).
- ANTONY, C.M.; SWAROOP, N.; THOMAS, T.; DAVID, A.A.; RAO, S. Effect of Different Levels of Inorganics and Biofertilizers on Post Harvest Soil Physico-Chemical Properties of Baby Corn (*Zea mays* L.) Variety- G-5414. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1501–1508, 2020. DOI:10.20546/ijcmas.2020.909.190
- ARAÚJO, A. S. F.; MAUAD, M.; TADEU, H. C.; LIMA FILHO, H.A Yield of cowpea genotypes inoculated with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum brasilense* in association with phosphate fertilization in Amazonian soil. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 12, p. 306–315, 2018. DOI:10.5539/jas.v10n12p306
- BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.
- CALDWELL, B. A. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. **Pedobiologia**, v. 49, n. 6, p. 637-644, 2005.
- CHEN, Y.; TIAN, W.; SHAO, Y.; LI, Y.; LIN, L.; ZHANG, Y.; HAN, H.; CHEN, Z. Miscanthus cultivation shapes rhizosphere microbial community structure and function as assessed by Illumina MiSeq sequencing combined with PICRUSt and FUNGUId analyses. **Archives of Microbiology**, v. 202, n. 5, p. 1157-1171, 2020. DOI: 10.1007/s00203-020-01830-1
- CHEN, Y.P.; TSAI, C.F.; HAMEED, A.; CHANG, Y.J.; YOUNG, CC. Agricultural management and cultivation period alter soil enzymatic activity and bacterial diversity in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) orchards. **Botanical Studies**, v. 62, n. 1, p. 22, 2021. DOI: 10.1186/s40529-021-00322-9
- DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, n. 7081, p. 165-173, 2006.
- DE MORAES, M. T. et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 200, p. 104611, 2020. DOI:10.1016/j.still.2020.104611

DEMOLING, F.; FIGUEROA, D.; BÅÅTH, E. Comparison of factors limiting bacterial growth in different soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 10, p. 2485-2495, 2007.

DICK, R. P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA Special Publication 35, 1994. p. 107-124.

EASWARAN, S.; MARIMUTHU, M.; GUHAN, V. Studies on the Effect of Integrated Nutrient Management on Leaf Nutrient Status and Enzymes Activities in Tea (*Camellia* sp.). **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 35, n. 2, p. 114-119, 2023. DOI: 10.9734/IJPSS/2023/v35i23078

FIERER, N.; LAUBER, C. L., RAMIREZ, K. S., ZANEVELD, J., BRADFORD, M. A., & KNIGHT, R Comparative metagenomic, phylogenetic and physiological analyses of soil microbial communities across nitrogen gradients. **The ISME Journal**, v. 6, n. 5, p. 1007-1017, 2012.

FITUMA, A.; TANA, T.; ARGAW, A. Effect of Inoculating *Bradyrhizobium* on Phosphorus Use Efficiency and Nutrient Uptake of Soybean in Calcareous Soil, Central Rift Valley, Ethiopia. **Ethiopian Journal of Agricultural Sciences**, v. 28, n. 1, p. 17–32, 2018.

GALINDO, F. S. et al. Chemical soil attributes after wheat cropping under nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 2, p. 659–672, 2017. DOI:10.5433/1679-0359.2017v38n2p659

GALINDO, F. S. et al. Nutrient availability affected by silicate and *Azospirillum brasilense* application in corn–wheat rotation. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 5227–5241, 2021.

GIANNETTA, B. et al. Distribution of soil organic carbon between particulate and mineral-associated fractions as affected by biochar and its co-application. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 360, 2024. DOI:10.1016/j.agee.2023.108777

GRIFFITHS, B. S.; PHILIPPOT, L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, n. 2, p. 112-129, 2013.

HAFEZ, M.; POPOV, A. M.; RASHAD, S. M. Efficient Eco-Friendly Organic Wastes Mixed with Growth Promoting Bacteria to Remediate and Increase Fertility of Saline Sodic Soil in Egypt. **Soil Discussions**, p. 1–25, 2019. DOI:10.5194/soil-2019-69

HASAN, M. M. Effect of rhizobium inoculation with phosphorus and nitrogen fertilizer on physico - chemical properties of the groundnut soil. **Environment Ecosystem Science**, v. 2, n. 1, p. 4–6, 2018 DOI:10.26480/ees.01.2018.04.06.

HRIDYA, A. C.; BYJU, K.; MISRA, R.S. Effects of microbial inoculations on soil chemical, biochemical and microbial biomass carbon of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) growing Vertisols. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 2, p. 239-249, 2014. DOI:10.1080/03650340.2013.791023

KASU-BANDI, M. et al. Effects of *Bradyrhizobium japonicum* on Some Chemical Properties of Ferralsols under Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) Cultivation. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 14, n. 1, p. 95–102, 2019. DOI:[10.3844/ajabssp.2019.95.102](https://doi.org/10.3844/ajabssp.2019.95.102)

KERTESZ, M. A.; MIRLEAU, P. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 404, p. 1939-1945, 2004.

KONG, Y. et al. Seasonal dynamics of soil enzymatic activity under different land-use types in rocky mountainous region of North China. **Forests**, v. 14, n. 3, p. 536, 2023.

KUZYAKOV, Y.; FRIEDEL, J. K.; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 11-12, p. 1485-1498, 2000.

KWIATKOWSKA, E.; JONIEC, J. Effects of agricultural management of spent mushroom waste on phytotoxicity and microbiological transformations of C, P, and S in soil and their consequences for the greenhouse effect. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 19, p. 12915, 2022

LEUTHOLD, S. et al. Contrasting properties of soil organic matter fractions isolated by different physical separation methodologies. **Geoderma**, v. 445, n. 116870, 2024. DOI:[10.1016/j.geoderma.2024.116870](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116870)

LI, J. et al. Microbiological mechanism of lignin- and humus-derived small molecules addition promoting straw conversion into soil organic matter in sodic soil. **Pedosphere**, v. 35, n.34, 2024. DOI:[10.1016/j.pedsph.2024.05.012](https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2024.05.012)

MAZETTO JÚNIOR, JC; TORRES, JLR; COSTA, DDDA; SILVA, VRE; SOUZA, ZMD; LEMES, EM. Produção e decomposição de resíduos de culturas de cobertura e associações com frações orgânicas do solo. **Journal Agriculture Sciece**, n.11, p. 58–69, 2019. DOI:[10.5539/jas.v11n5p58](https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p58)

MOOSHAMMER, M. et al. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon: nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. **Nature Communications**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2014.

MOREIRA, F. R. et al. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 118–127, 2014. DOI:[10.1590/S0100-06832014000100011](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100011)

MORETTI, L. G.; CRUSCIOL, C. A. C. LEITE, M. F. A.; MOMESSO, L.; BOSSOLANI, J. W.; COSTA, O. Y. A.; HUNGRIA, M.; KURAMAE, E. E. Diverse bacterial consortia: key drivers of rhizosoil fertility modulating microbiome functions, plant physiology, nutrition, and soybean grain yield. **Environmental Microbiome**, v. 19, n. 1, 2024. DOI: 10.1186/s40793-024-00595-0

NANNIPIERI, P. et al. Soil enzymology: Classical and molecular approaches. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, n. 7, p. 743-762, 2012.

NEMERGUT, D. R. et al. Patterns and processes of microbial community assembly. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 77, n. 3, p. 342-356, 2013.

NIU, Y. et al. Microbial transformation mechanisms of particulate organic carbon to mineral-associated organic carbon: Highlighting temperature and moisture. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 195, n. 109454, 2024. [DOI: 10.1016/j.soilbio.2024.109454](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109454)

PEREIRA, F. de S. et al. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 211–218, 2010. [DOI:10.1590/S0100-06832010000100021](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000100021)

PHILIPPOT, L. et al. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. **The ISME Journal**, v. 7, n. 8, p. 1609-1619, 2013.

Phosphate Fertilization and *Azospirillum brasilense* Inoculation in No-Till Systems. **Applied Sciences**, v. 15, n. 13, p. 7146, 2025. [DOI:10.3390/app15137146](https://doi.org/10.3390/app15137146)

PRIMEC, M. et al. Spent mushroom substrate improves microbial quantities and enzymatic activity in soils of different farming systems. **Microorganisms**, v. 12, n. 8, p. 1521, 2024.

RAMALAKSHMI, A.; [INIYAKUMAR](#), M.; [RAJ](#), S. A. Influence of biofertilizers on soil physico-chemical and biological properties during cropping period. **Asian Journal of Biological Sciences**, v. 3, n. 1, p. 348-351, 2008.

RAMOS, F. T. et al. Correlation of the least limiting water range with soil physical attributes, nutrient levels and soybean yield. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 21, p. 2240–2247, 2015. [DOI:10.5897/AJAR2015.9657](https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9657)

RIBEIRO, N. A. A. et al. Soil Bioindicators and Crop Productivity Affected by Legacy SCHIMEL, J. P.; SCHAEFFER, S. M. Microbial control over carbon cycling in soil. **Frontiers in Microbiology**, v. 3, p. 348, 2012.

SHADE, A. et al. Fundamentals of microbial community resistance and resilience. **Frontiers in Microbiology**, v. 3, p. 417, 2012.

SHARMA, R.; KUMAR, D.; KAPOOR, N.; OHRI, P. Insights into the biodiversity, mechanisms and plant growth-promoting effects of *Bradyrhizobium* and its potential in sustainable agriculture: A review. **Pedosphere**, v. 36, n. 1, p. 147-164, 2026. DOI: 10.1016/j.pedsph.2025.06.017

SILVA, P.S.T. et al. *Azospirillum brasilense* Inoculation in a Maize–Urochloa–Rice Cropping System Promotes Soil Chemical and Biological Changes and Increases Productivity. **Crops**, v. 4, n. 2, p. 181–198, 2024. [DOI:10.3390/crops4020016](https://doi.org/10.3390/crops4020016)

SINGH, V.; GAMAGE, H.; JONES, A. et al. Fungal endophytes influence soil organic carbon and nitrogen fractions promoting carbon sequestration and improving grain yield in soybean. **Scientific Reports**, n. 11402, 2025. DOI:10.1038/s41598-025-94982-3

SINSABAUGH, R. L. et al. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment. **Nature**, v. 462, n. 7274, p. 795-798, 2009.

SINSABAUGH, R. L. et al. Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. **Ecology Letters**, v. 11, n. 11, p. 1252-1264, 2008

SINSABAUGH, R. L.; CARREIRO, M. M.; REPERT, D. A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss. **Biogeochemistry**, v. 60, n. 1, p. 1-24, 2002.

STEINWEG, J. M. et al. Patterns of substrate utilization during long-term incubations at different temperatures. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 11, p. 2722-2728, 2008.

STERNER, R. W.; ELSER, J. J. **Ecological stoichiometry**: the biology of elements from molecules to the biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002.

STRICKLAND, M. S.; ROUSK, J. Considering fungal: bacterial dominance in soils—methods, controls, and ecosystem implications. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1385-1395, 2010.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2958, 2022. DOI:[10.3390/su14052958](https://doi.org/10.3390/su14052958)

TORRES, J. L. R. et al. Mechanical and Biological Soil Decompaction for No-Tillage Maize Production. **Agronomy**, v. 12, n. 10, p. 2310, 2022. DOI:[10.3390/agronomy12102310](https://doi.org/10.3390/agronomy12102310)

TÜL, S., FRANTZESKOU, M., & PARANYCHIANAKIS, N. V. Ecological enzyme stoichiometry reveals seasonal and treatment-induced constraints on C, N, and P dynamics in olive orchard soils. **EGUsphere**. 2025. DOI:[10.5194/egusphere-egu25-854](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-854)

VENDRUSCOLO, E.; MESA, D.; MISSIO, R. Effect in soil and rhizosphere microbiota of *Brachiaria* inoculated with *Azospirillum brasilense*: a pilot trial in two oxisol types. **Soil Research**, v. 61, n. 4, p. 365-377. 2023. DOI:[10.1071/SR22201](https://doi.org/10.1071/SR22201)

WANG, J.; ZHANG, Y. Long-term organic fertilization reshapes the communities of bacteria and fungi and enhances the activities of C- and P-cycling enzymes in calcareous alluvial soil. **Applied Soil Ecology**, v. 195, p. 105204, 2024.

XING, W. et al. Soil enzyme profile analysis for indicating decomposer micro-food web. **iMeta**, v. 3, n. 1, e161, 2024.

ZHANG, Y. et al. Simulating measurable ecosystem carbon and nitrogen dynamics with the mechanistically defined MEMS 2.0 model. **Biogeosciences**, v. 18, p. 3147-3171, 2021. [DOI: 10.5194/bg-18-3147-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-3147-2021)

7.2 CAPÍTULO 2 - PLANTAS DE COBERTURA (SORGO E CAPINS)

7.2.1 Análises do sorgo

7.2.1.1 Atributos de desenvolvimento e componentes de produção do sorgo granífero

As estratégias de inoculação e inoculação adicional da soja influenciaram significativamente a maioria dos componentes de produção do sorgo em sucessão, com respostas variáveis entre as safras (Tabela 10).

Os resultados da safra de 2023 demonstraram contraste no desempenho do sorgo, quando cultivado em sucessão às diferentes estratégias de inoculação e microrganismos adotados na soja. O uso de microrganismos diazotróficos para impactar na produção vegetal é amplamente documentado, e é influenciado pela complexa interação entre o genótipo da planta hospedeira, a estirpe bacteriana utilizada e as condições edafoclimáticas de cada ciclo da cultura (Thewage, 2021).

Observa-se elevado acúmulo de biomassa vegetal, com a PG foi expressivamente superior na Inoculação 1 (Fator 2), alcançando 5186 kg ha^{-1} , sobre a menor produtividade do período (Inoculação 4, Fator 1: 1943 kg ha^{-1} (Tabela 10). A população de plantas (POP), foi destaque na Inoculação 3.2, e a Inoculação 3, combinada ao Fator Adicional 1 e 2, proporcionou os maiores valores de Massa Verde de Colmo (MVC), enquanto que a inoculação 2.1 foi destaque para Massa Verde da Folha (MVF), atingindo 4000 kg ha^{-1} . Sendo então, o desempenho do sorgo evidenciou o estímulo das estratégias de inoculação da cultura antecessora (soja) no crescimento e desenvolvimento vegetativo (Tabela 10).

Quanto aos atributos de MSC (2223 kg ha^{-1}) e MSP e (4121 kg ha^{-1}), inicialmente os tratamentos 3.2 e 1.1, foram destaques dentre os demais, respectivamente. Esses resultados estão relacionados com os mecanismos fisiológicos estimulados pela produção bacteriana de auxinas. Malhotra e Sharma (2006) demonstraram que a superexpressão de ácido indolacético (AIA) beneficia o enraizamento lateral e consequentemente maior massa seca da planta.

Em contrapartida, os atributos de Massa de mil grãos (M1000), Comprimento da panícula (CP), Altura da planta (ALT), Diâmetro do Colmo (DC) e Massa Seca da Folhas (MSF), não foram alterados pelo manejo biológico da soja em 2023, mantendo médias próximas de 200 g, 30 cm, 0,91 m e 1,45 mm, 1200 kg ha^{-1} , respectivamente,

o que denota maior uniformidade no porte das plantas. Além disso, os fatores ambientais, fisiológicos e genéticos podem ter contribuído para esses resultados, e os efeitos nas raízes que não necessariamente se tornam incrementos imediatos e significativos nos parâmetros de análise (Rondina *et al.*, 2020). A colonização radicular das bactérias resulta em maior número de pêlos radiculares, aumentando a superfície de exploração do solo e favorecendo a absorção de nutrientes (Kochar *et al.*, 2012).

Na safra de 2024, é imprescindível citar a perda inesperada por agente biótico (maritacas) da M1000, e consequentemente, da produção de grãos de toda a área experimental (Tabela 10).

Observaram-se respostas específicas nos tratamentos, provavelmente em virtude das condições climáticas restritivas que ocorreram naquele ano (Figura 2B). De acordo com Creus *et al.* (2010), o modelo *Azospirillum*-gramíneas é fundamental para promover o crescimento sob estresses abióticos, ajudando a planta a manter processos vitais mesmo sob baixa disponibilidade hídrica. Entretanto, não houve efeito residual dos tratamentos na soja sobre as massas verdes e secas de colmo e folhas, comprimento de panícula e massa verde da panícula. A Massa Seca da Panícula (MSP) sob a Inoculação 4 (Fator 2) atingiu 4456 kg ha⁻¹. Esse comportamento sugere que, sob estresse, as plantas priorizaram o direcionamento de fotoassimilados aos componentes reprodutivos em detrimento dos vegetativos (Schumacher *et al.*, 2021).

A população de plantas (POP) na safra de 2024, variou de 74731 a 91529 plantas ha⁻¹. Paralelamente, houve aumento na altura do dossel, com destaque para a Inoculação 2 (Fator 1), que atingiu 1,36 m e superou o tratamento sem inoculação da soja antecessora Controle).

O uso dos tratamentos 2.1 e 3.2, mostrou-se benéfico para o DC indicando que o aporte biológico suplementar para melhor desenvolvimento estrutural e nutricional da planta, melhorando a eficiência na absorção de nutrientes. A interação com o manejo químico e a estabilidade produtiva das plantas, é citado por Dartora *et al.* (2013), onde observaram que a adubação nitrogenada associada à inoculação de microrganismos potencializa o desenvolvimento de gramíneas, e por Thakare *et al.* (2024), que destacaram a otimização da rentabilidade em cultivos de safra com inoculação das plantas antecessoras.

Tabela 10 – Componentes de produção e produtividade do sorgo em função de estratégias de inoculação e inoculação adicional da soja antecessora, nas safras de 2023 e 2024.

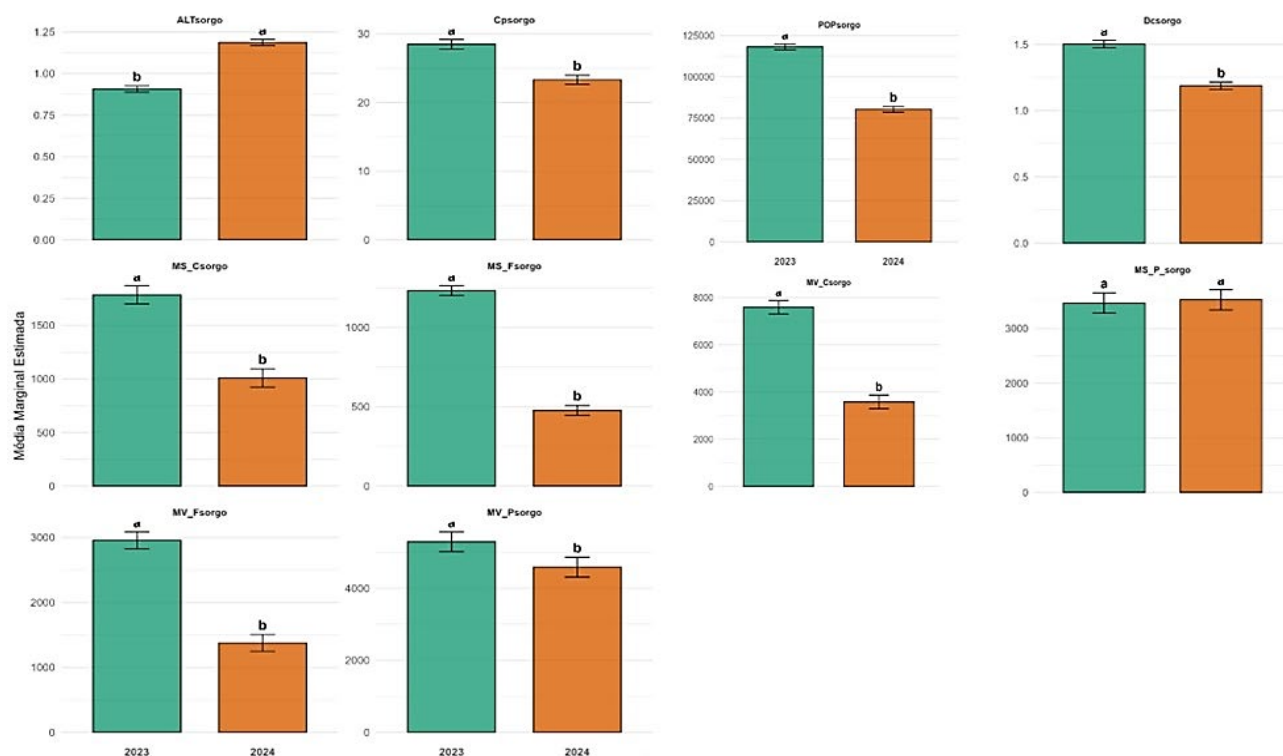
Atributos do sorgo nas safras de 2023 e 2024														
Ano Safra	Inoculação	Fator Inoc Adic	Parâmetros avaliados											
			M1000	PG	POP	CP	ALT	DC	MVC	MSC	MVF	MSF	MVP	MSP
2023	1	1	202 ^a	2457 ^{cd}	117037 ^{ab}	30,0 ^a	0,91 ^a	1,45 ^a	6282 ^{bc}	1514 ^{bc}	2458 ^{bc}	1396 ^a	6071 ^a	4121,25 ^a
		2	212 ^a	5186 ^a	125555 ^{ab}	29,5 ^a	0,90 ^a	1,52 ^a	8191 ^{ab}	1876 ^{abc}	3356 ^{ab}	1297 ^a	5760 ^a	3653,25 ^{ab}
	2	1	204 ^a	3901 ^{ab}	110833 ^b	30,7 ^a	0,92 ^a	1,70 ^a	7985 ^{abc}	1870 ^{abc}	3345 ^{ab}	1257 ^a	5794 ^a	3660,75 ^{ab}
		2	201 ^a	3745 ^{bc}	113333 ^{ab}	28,7 ^a	0,94	1,55 ^a	8328 ^{ab}	1901 ^{abc}	4000 ^a	1340 ^a	4582 ^{ab}	2942,50 ^{bc}
	3	1	218 ^a	4527 ^{ab}	120370 ^{ab}	30,2 ^a	0,93 ^a	1,50 ^a	9199 ^a	1956 ^{ab}	3441 ^{ab}	1094 ^a	5541 ^a	3656,75 ^{ab}
		2	218 ^a	4435 ^{ab}	135185 ^a	29,5 ^a	0,91 ^a	1,44 ^a	8646 ^a	2223 ^a	2822 ^{bc}	1380 ^a	5992 ^a	3992,00 ^{ab}
	4	1	215 ^a	1943 ^d	109537 ^b	28,5 ^a	0,86 ^a	1,38 ^a	5878 ^c	1364 ^c	2004 ^c	970 ^a	3685 ^b	2340,75 ^c
		2	207 ^a	3265 ^{bcd}	112963 ^{ab}	28,5 ^a	0,87 ^a	1,44 ^a	6223 ^{bc}	1583 ^{bc}	2213 ^c	1115 ^a	4902 ^{ab}	3342,00 ^{abc}
2024	1	1	-	-	74731 ^b	24,0 ^a	1,09 ^{bc}	1,11 ^{ab}	3471 ^a	935 ^a	1128 ^a	406 ^a	2919 ^b	2097,00 ^c
		2	-	-	74907 ^b	22,8 ^a	1,03 ^c	1,02 ^b	3331 ^a	950 ^a	1303 ^a	466 ^a	2914 ^b	2441,00 ^{bc}
	2	1	-	-	82638 ^{ab}	24,0 ^a	1,36 ^a	1,36 ^a	3597 ^a	841 ^a	1440 ^a	583 ^a	4025 ^{ab}	3783,00 ^{ab}
		2	-	-	76996 ^b	22,5 ^a	1,12 ^{abc}	1,12 ^{ab}	3824 ^a	1616 ^a	1483 ^a	381 ^a	5903 ^a	4032,00 ^a
	3	1	-	-	80925 ^b	23,1 ^a	1,20 ^{abc}	1,20 ^{ab}	3188 ^a	856 ^a	1188 ^a	421 ^a	4735 ^{ab}	3909,00 ^{ab}
		2	-	-	76759 ^b	22,8 ^a	1,30 ^{ab}	1,30 ^a	3470 ^a	942 ^a	1429 ^a	514 ^a	5020 ^{ab}	3767,00 ^{ab}
	4	1	-	-	83888 ^{ab}	23,7 ^a	1,23 ^{abc}	1,23 ^{ab}	3652 ^a	914 ^a	1354 ^a	496 ^a	5479 ^{ab}	3720,00 ^{ab}
		2	-	-	91529 ^a	23,3 ^a	1,14 ^{bc}	1,14 ^{ab}	4081 ^a	1022 ^a	1674 ^a	553 ^a	5694 ^{ab}	4456,00 ^a

Fonte: produção da própria autora.

Médias seguidas por letras iguais nas colunas, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). M1000: Massa de 1000 grãos (g); PG: Produtividade de grãos (kg ha⁻¹); POP: População de plantas (plantas/ha⁻¹); CP: Comprimento de panícula (cm); ALT: Altura de plantas (m); DC: Diâmetro do colmo (mm); MV C/F/P: Massa verde do colmo, folha e panícula (kg ha⁻¹); MS C/F/P: Massa seca do colmo, folha e panícula (kg ha⁻¹). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional (F.I.A): sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1

A análise comparativa interanual expôs oscilações substanciais no desempenho fitotécnico do sorgo (Figura 8).

Figura 8 – Comparação interanual (2023 vs. 2024) dos parâmetros biométricos e produtivos do sorgo.



Fonte: produção da própria autora.

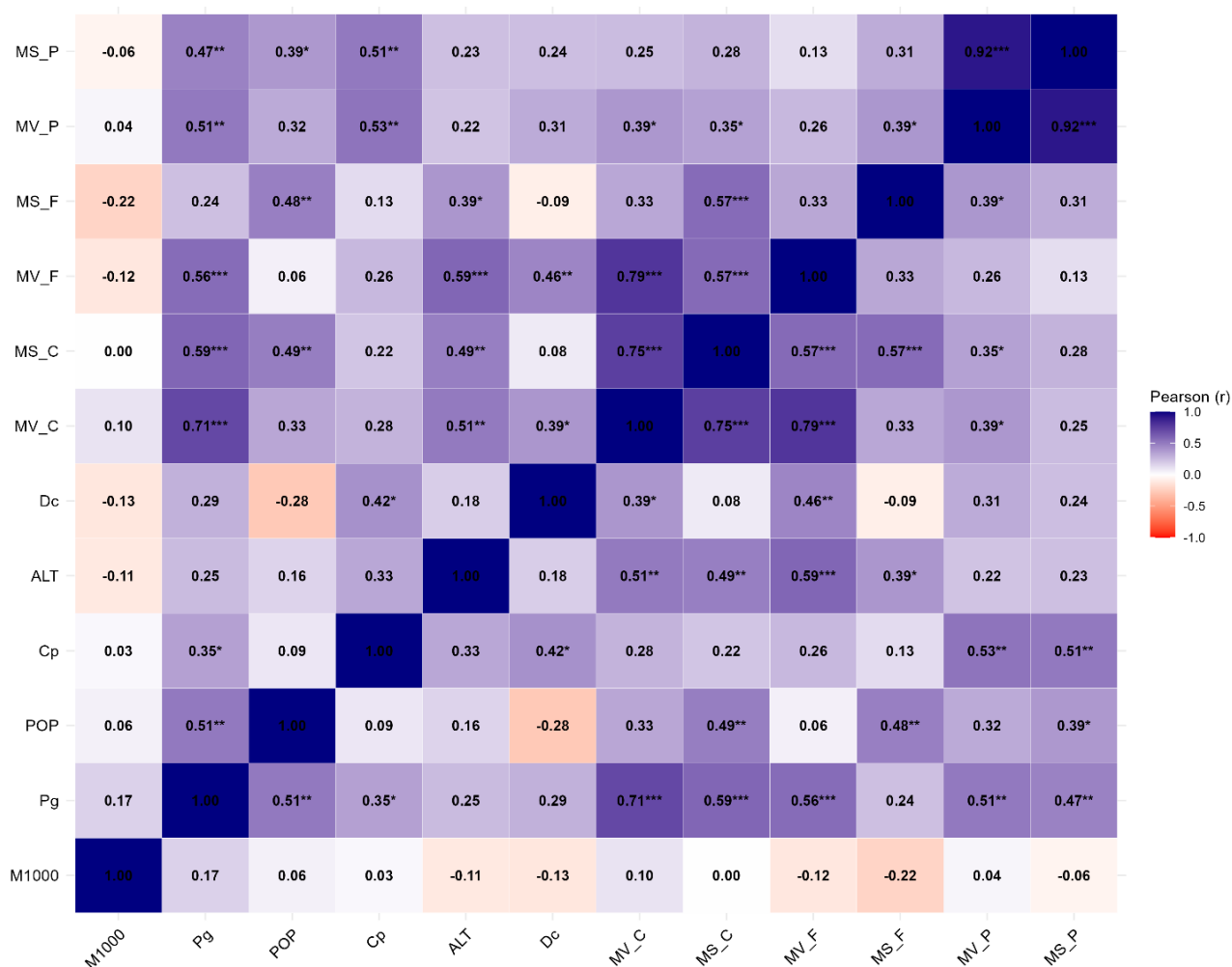
Legenda: As barras representam a média geral de todos os tratamentos para cada ano agrícola. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença estatística significativa entre as safras pelo teste de comparação de médias ($p < 0,05$). M1000: Massa de 1000 grãos (g); PG: Produtividade de grãos (kg ha⁻¹); POP: População de plantas (plantas/ha⁻¹); CP: Comprimento de panícula (cm); ALT: Altura de plantas (m); DC: Diâmetro do colmo (mm); MV C/F/P: Massa verde do colmo, folha e panícula (kg ha⁻¹); MS C/F/P: Massa seca do colmo, folha e panícula (kg ha⁻¹).

Verificou-se incremento significativo na ALT em 2024, porém este crescimento não resultou em maior biomassa total; houve reduções no comprimento da panícula (CP), no DC e na POP em comparação com 2023. Quanto à fitomassa, as massas verde (MV) e seca (MS) de colmos e folhas apresentaram decréscimos acentuados no segundo ano. A MSP manteve-se estável entre as safras, sinalizando que, apesar do menor vigor vegetativo e densidade populacional em 2024, a cultura preservou sua eficiência reprodutiva e utilizou suas reservas para a produção dos grãos (Figura 8).

7.2.1.2 Análises de correlação entre os atributos de desenvolvimento vegetativo e produtividade do sorgo nas safras de 2023 e 2024.

Os componentes de produção e produtividade do sorgo mostraram padrões de correlação distintos entre as safras de 2023 e 2024, deixando evidente a influência da sazonalidade na interdependência das variáveis (Figura 9 e Figura 10). A variabilidade entre as safras reflete a interação genótipo e ambiente (Santana *et al.*, 2022).

Figura 9 – Matriz de correlação de Pearson entre atributos de produção e desenvolvimento de sorgo (*Sorghum bicolor*) na safra 2023.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os parâmetros incluem massa de mil grãos (M1000), peso de grãos (Pg), população de plantas (POP), comprimento de panícula (Cp), altura de plantas (ALT), diâmetro de colmo (Dc) e biomassa verde e seca de colmo (MV_C, MS_C), folhas (MV_F, MS_F) e panícula (MV_P, MS_P). O gradiente de cor azul-marinho representa correlações positivas (+1), enquanto o vermelho indica correlações negativas (-1). Asteriscos indicam níveis de significância: * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$) e *** ($p < 0,001$).

No ciclo agrícola de 2023 (Figura 9), observaram-se diversas correlações positivas e altamente significativas, entre os componentes de biomassa e produtividade. Destacam-se as fortes associações positivas entre produtividade de grãos (PG) e a massa verde do colmo (MV_C: $r = 0,71$; $p < 0,001$). Além disso, a biomassa verde e seca de diferentes órgãos apresentou correlações extremamente elevadas entre si, como observado entre MV_C e MS_C ($r = 0,75$; $p < 0,001$) e entre MV_P e MS_P ($r = 0,92$; $p < 0,001$).

Variáveis morfológicas como MV_C também demonstraram correlações significativas positivas com os componentes de massa foliar (MV_F) e PG, sugerindo que o vigor vegetativo foi um determinante direto do acúmulo de massa verde na planta durante o período experimental. Essa alta correlação entre o desenvolvimento vegetativo e o rendimento final de grãos (Bashan *et al.*, 2010), indicam que o incremento na área foliar e biomassa radicular foi proporcionado pela ação da *Azospirillum* residual da soja, que promoveu maior produtividade de biomassa no campo. Em condições favoráveis, a planta desempenha com máxima eficiência a captação de recursos, onde o aumento da fonte, que são as folhas e colmo, possui correlação com o dreno, que são os grãos.

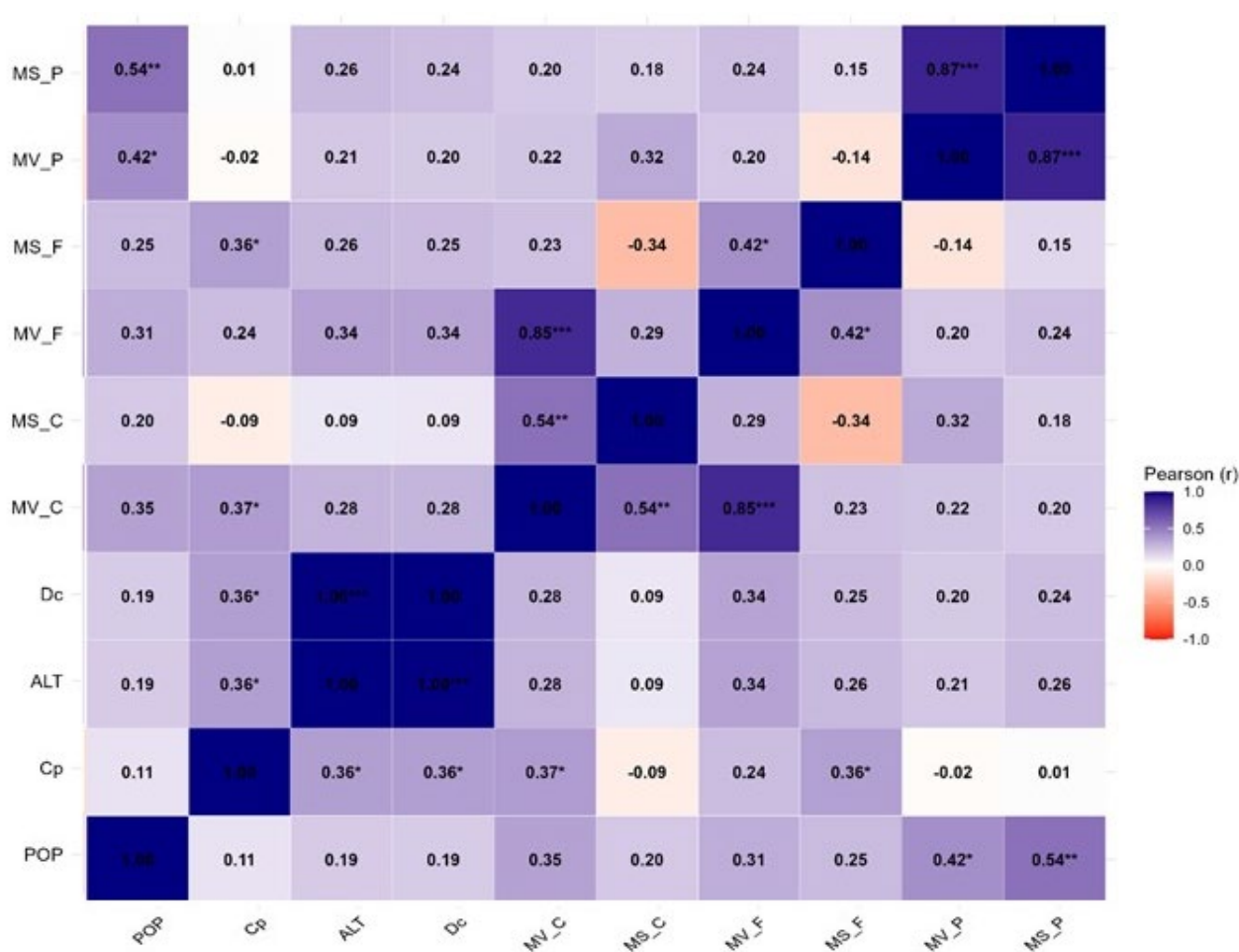
Em contrapartida, na safra 2024 (Figura 10), embora a correlação positiva tenha persistido entre algumas variáveis, as magnitudes das correlações foram, em geral, com valores mais altos. Notavelmente, a associação entre altura (ALT) e diâmetro de colmo (DC) atingiu o valor máximo ($r = 1,00$; $p < 0,001$), indicando que essas características são determinadas por fatores estruturais e genéticos em virtude da planta necessitar maior suporte físico à medida com que ela cresce. Ademais, o colmo do sorgo tem como função realizar o suporte mecânico e armazenamento de açúcares solúveis, sendo o diâmetro um indicativo direto do vigor do sistema vascular e da capacidade de suporte da panícula (Magalhães *et al.*, 2003).

A biomassa seca e verde da panícula (MS_P) e (MV_P), respectivamente, mantiveram uma correlação muito forte ($r = 0,87$; $p < 0,001$), e a correlação positiva entre MV_F e MV_C também registrada em 2023 e 2024 ($r = 0,85$, $p < 0,001$), confirma a consistência desses parâmetros na área experimental, independentemente das variações anuais.

Nota-se que houve variação nos padrões de correlação nas safras de 2023 e 2024 (Figura 9 e 10) evidenciando que a expressão dos componentes de rendimento do sorgo foi estimulada pela interação genótipo-ambiente, impactando nas estratégias

adaptativas distintas frente à sazonalidade. Em 2023, obteve-se alta correlação entre a PG e a massa verde de colmo e panículas (MV_C e MV_P), indicando que o vigor vegetativo atua como um reservatório de fotoassimilados que são posteriormente translocados para a parte reprodutiva da planta (Magalhães *et al.*, 2003). Essa relação direta entre a massa acumulada e a produtividade final é proveniente de condições climáticas que favorecem a taxa de expansão foliar e a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa.

Figura 10 – Matriz de correlação de Pearson entre atributos de produção e desenvolvimento de sorgo na safra 2024.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os parâmetros incluem: população de plantas (POP), comprimento de panícula (Cp), altura de plantas (ALT), diâmetro de colmo (Dc) e biomassa verde e seca de colmo (MV_C, MS_C), folhas (MV_F, MS_F) e panícula (MV_P, MS_P). O gradiente de cor azul-marinho representa correlações positivas (+1), enquanto o vermelho indica correlações negativas (-1). Asteriscos indicam níveis de significância: * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,01$) e *** ($p < 0,001$).

Por fim, a persistência das correlações entre massa verde e seca (MV e MS) em ambas as safras reafirma a estabilidade do acúmulo de matéria seca, como característica do sorgo. A alta relação entre MV_P e MS_P ($r > 0,87$) torna evidente que, independentemente da safra, a panícula mantém uma cinética de desidratação e acúmulo de massa previsível, consolidando-se como o principal componente de avaliação do potencial produtivo da cultura (Magalhães *et al.*, 2003; Borém *et al.*, 2014).

A característica do sorgo em ser estável na produção de biomassa da panícula, pode ter o efeito mais proeminente pela atuação dos microrganismos inoculados nas culturas antecessoras. A inoculação pode impactar positivamente as plantas, ao promover estabilidade, evidenciando a sustentabilidade do sistema e beneficiando as culturas sucessoras (Bulegon *et al.*, 2016; Soares *et al.*, 2023).

7.2.2 Análises dos capins

7.2.2.1 Nutrição dos capins

A análise do tecido vegetal do capim revelou que as estratégias de inoculação e inoculação adicional na soja exerceram influência limitada sobre a concentração de macronutrientes dentro de um mesmo ano agrícola, com maior estabilidade observada no primeiro ciclo (Tabela 11).

Tabela 11 – Teores de nutrientes na biomassa do capim em função de estratégias de inoculação e inoculação adicional na soja antecessora, nas safras de 2023 e 2024.

Ano Safra	Inoc	Fat Inoc Adic	Nutrientes					
			N	P	K	Ca	Mg	S
2023	1	1	15,03 ^a	2,15 ^a	21,40 ^a	2,28 ^a	2,65 ^a	0,93 ^a
		2	16,03 ^a	2,03 ^a	22,33 ^a	2,28 ^a	2,83 ^a	0,98 ^a
	2	1	16,33 ^a	2,18 ^a	20,90 ^a	2,13 ^a	2,95 ^a	0,98 ^a
		2	14,43 ^a	2,30 ^a	18,33 ^a	1,90 ^a	2,63 ^a	0,90 ^a
	3	1	16,50 ^a	2,08 ^a	23,48 ^a	2,23 ^a	2,93 ^a	0,93 ^a
		2	15,18 ^a	1,90 ^a	22,15 ^a	2,13 ^a	2,80 ^a	0,88 ^a
	4	1	15,88 ^a	1,95 ^a	22,28 ^a	2,10 ^a	2,38 ^a	0,93 ^a
		2	14,93 ^a	1,78 ^a	24,33 ^a	1,95 ^a	2,23 ^a	0,95 ^a

Ano Safr	Inoc	Fat Inoc Adic	Nutrientes					
			N	P	K	Ca	Mg	S
2024	1	1	22,30 ^a	3,13 ^a	22,35 ^b	3,10 ^a	3,80 ^{bc}	2,30 ^a
		2	24,43 ^a	3,18 ^a	24,95 ^b	2,93 ^a	3,60 ^c	2,33 ^a
	2	1	23,33 ^a	3,23 ^a	23,85 ^b	3,30 ^a	3,53 ^c	2,33 ^a
		2	23,73 ^a	3,25 ^a	24,75 ^b	3,13 ^a	3,38 ^c	2,58 ^a
	3	1	24,65 ^a	3,05 ^a	25,20 ^b	4,23 ^a	5,10 ^a	2,48 ^a
		2	22,68 ^a	2,78 ^a	27,28 ^{ab}	4,60 ^a	4,88 ^{ab}	2,28 ^a
	4	1	23,88 ^a	3,05 ^a	40,95 ^a	4,45 ^a	5,43 ^a	2,33 ^a
		2	26,65 ^a	3,18 ^a	41,25 ^a	4,33 ^a	5,38 ^a	2,38 ^a

(Conclusão)

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras iguais nas colunas, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). N, P, K, Ca, Mg e S representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre, respectivamente (g/kg). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional (Fat.Inoc.Adic): sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estádio R1.

Em 2023, não foram observadas diferenças para nenhum dos macronutrientes em resposta aos tratamentos biológicos realizados na soja, ou seja, não houve impactos na absorção dos nutrientes pelo capim Piatã, portanto, indica-se que houve absorção uniforme pela forragem no período inicial da implantação do experimento. Este fato é observado em sistemas de pastagens recém-implantados, onde o efeito imediato da inoculação com *Azospirillum brasilense* e outras bactérias denominadas BPCP focam primordialmente na colonização da rizosfera e no estabelecimento radicular, para posteriormente incrementar na nutrição da parte aérea (Heinrichs *et al.*, 2020; Hungria *et al.*, 2021).

Na safra agrícola de 2024, embora os teores de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Cálcio (Ca) e Enxofre (S) não apresentem diferenças significativas, ou seja, foram homogêneos entre os tratamentos, observaram-se respostas diferentes para Potássio (K) e Magnésio (Mg) (Tabela 11).

Para o K, o tratamento 4 independentemente de inoculação adicional ou não da soja antecessora, promoveu os maiores teores no capim Paiaguás. Quanto ao Mg, os tratamentos 2.1, 4.1 e 4.2 apresentaram concentrações superiores em comparação

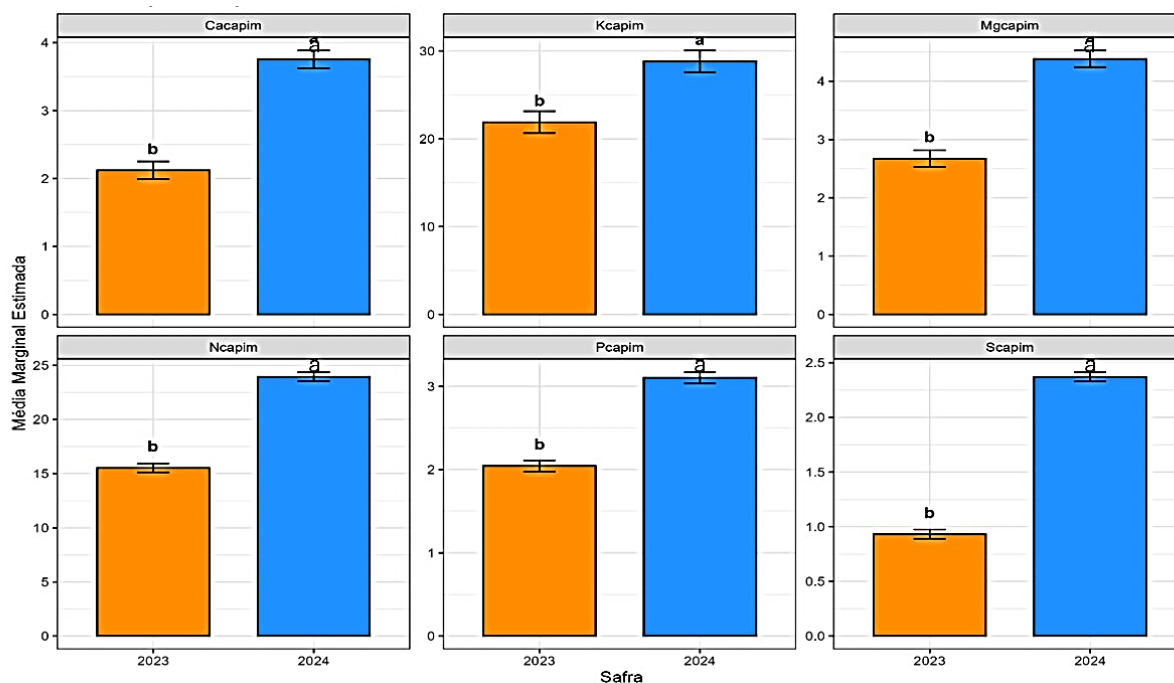
às demais estratégias biológicas. O destaque desses dois macronutrientes é em virtude da persistência dos microrganismos na área mesmo após meses de inoculação na soja, que entraram em sinergismo e promoveram melhor nutrição e crescimento no capim Paiaguás. A inoculação adicional aumentou a eficiência das raízes em absorver nutrientes tornando-a mais eficiente para captar esses elementos na soja (Chibeba *et al.*, 2015; Rondina *et al.*, 2020) e serem reciclados para o capim em sucessão (Queiroz Rego *et al.*, 2018).

A comparação interanual evidenciou incremento significativo e generalizado na densidade nutricional da forragem no segundo ano de avaliação (Figura 11).

Verificou-se um aumento substancial nos teores de todos os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na safra de 2024 (capim Paiaguás) em relação a 2023 (capim Piatã). Este acúmulo nutricional mais elevado na segunda safra pode estar associado à melhoria dos indicadores químicos do solo observados no mesmo período (Tabela 7) e maior eficiência de translocação de nutrientes pela cultura sob o efeito residual do manejo biológico continuado no sistema (histórico de dois anos dos tratamentos). Além disso, pode-se citar os diferentes cultivares utilizados na área experimental, o capim Piatã no ciclo de 2023 e do capim Paiaguás em 2024. Por serem diferentes cultivares, apresentam características próprias, sendo o Paiaguás o capim que possui vantagens de acumular melhor valor nutritivo durante a estação seca, quando comparado ao Piatã (Euclides *et al.*, 2016).

Outro benefício a destacar é que a inoculação da soja tende a ter efeito acumulativo (residual), já que a primeira inoculação dos microrganismos foi no ciclo da soja de 2022. A produção de fitohormônios, como auxinas, altera o crescimento radicular ao longo das safras, aumentando a área de exploração do solo e a capacidade de absorção de íons (Hungria *et al.*, 2021; Sampaio *et al.*, 2021).

Figura 11 – Comparação interanual (2023 vs. 2024) dos teores médios de nutrientes na fitomassa dos capins Piatã e Paiaguás.



Fonte: produção da própria autora.

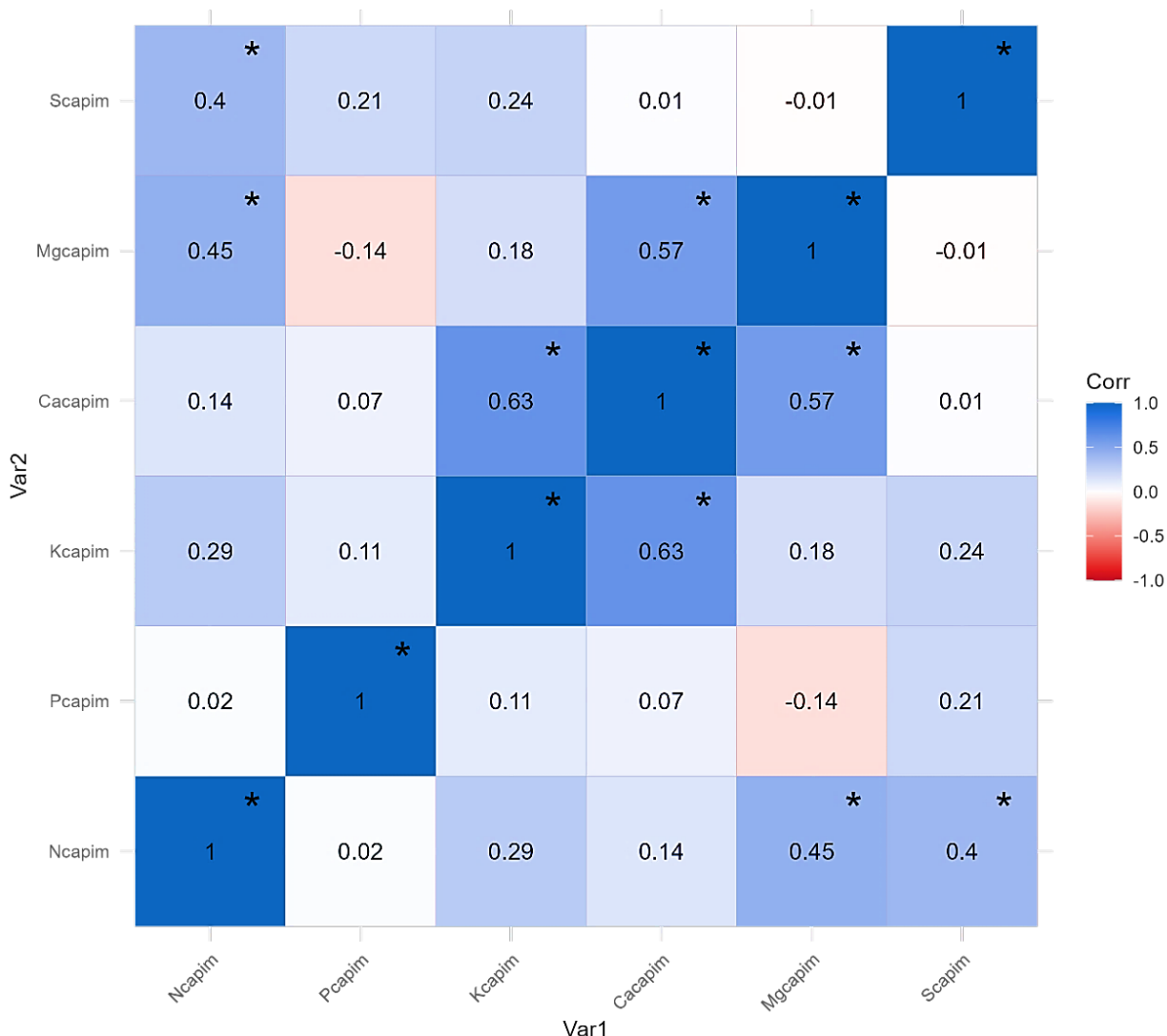
Legenda: As barras representam a média geral de todos os tratamentos para cada ano agrícola. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença estatística significativa entre as safras pelo teste de comparação de médias ($p < 0,05$).

7.2.2.2 Correlações nutricionais na fitomassa da forragem

As análises de correlação de Pearson mostraram associações sinérgicas significativas entre os macronutrientes na biomassa dos capins, sob manejo biológicos da soja, com variações na rede de dependência entre as safras (Figura 12 e Figura 13). Observou-se que a absorção de cátions e ânions seguiu padrões de equilíbrio iônico e sinergismo fisiológico característicos de gramíneas forrageiras.

Na safra de 2023, foram destaque as correlações positivas e significativas entre o K e Ca ($r = 0,63$) e, Ca e Mg ($r = 0,57$), indicando uma absorção concomitante desses nutrientes (Figura 12). Ademais, o N exibiu associações moderadas com o Mg ($r = 0,45$) e o S ($r = 0,40$), reforçando a estreita relação metabólica entre esses nutrientes na síntese proteica e na constituição da molécula de clorofila (Sampaio *et al.*, 2021; Andrade *et al.*, 2022).

Figura 12 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na biomassa do capim na safra de 2023.



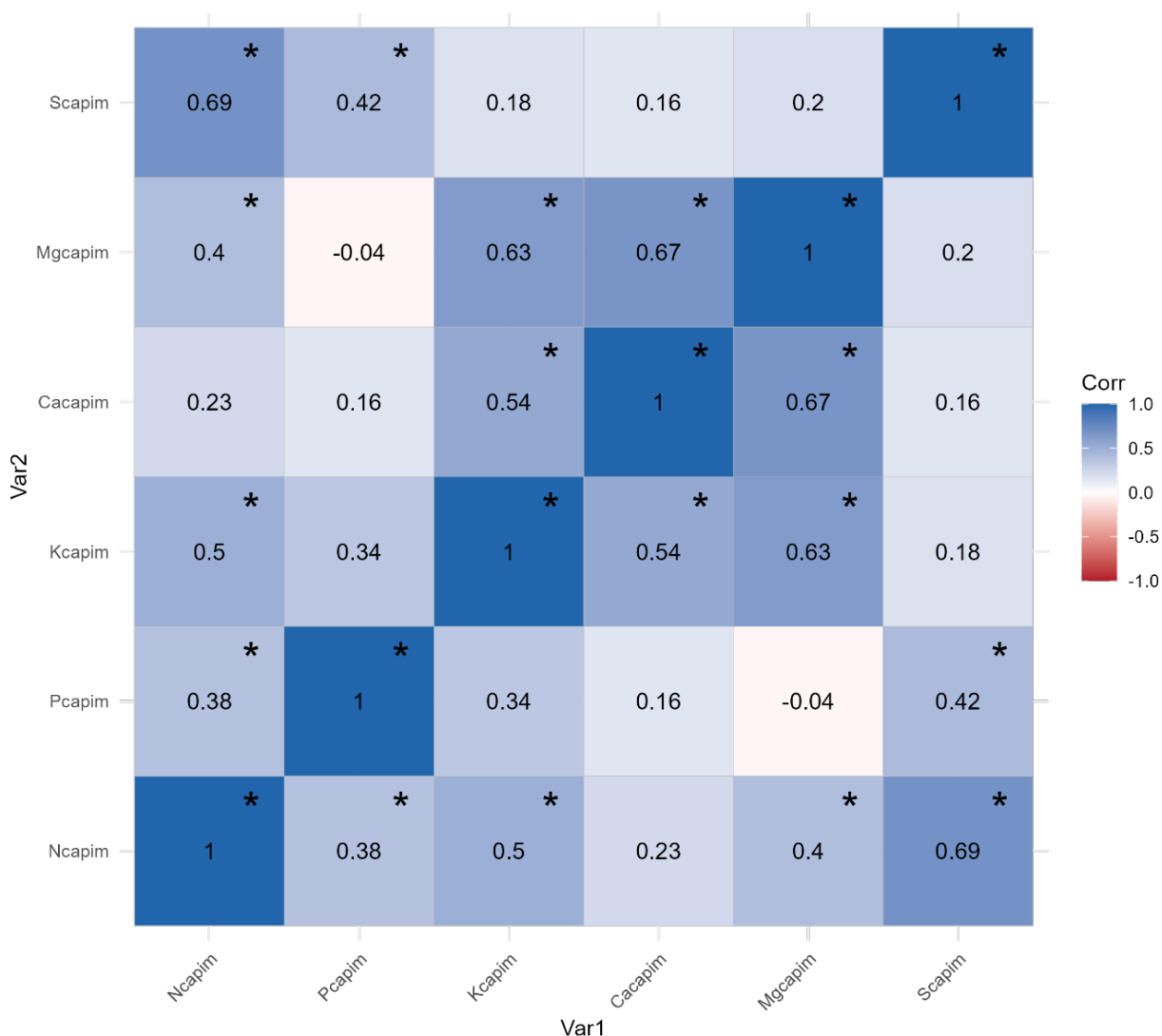
Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os valores numéricos indicam o coeficiente de correlação (r). O asterisco (*) denota correlação estatisticamente significativa ($p < 0,05$). A escala de cores representa a intensidade da associação, variando de -1 (vermelho) a 1 (azul). Ncapim, Pcapim, Kcapim, Cacapim, Mgcapim e Scapim representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre.

Na safra de 2024, a rede de relações tornou-se mais forte, com um maior número de associações significativas (Figura 13). O sinergismo entre N e S intensificou-se consideravelmente ($r = 0,69$), refletindo em estado nutricional mais equilibrado e favorável à produção de aminoácidos sulfurados. Observou-se também, assim como no ano de 2023, que o Ca apresentou correlações fortes e positivas com o Mg ($r = 0,67$) e o K ($r = 0,54$), assim como o Mg com o K ($r = 0,63$), sugerindo uma melhoria

da fertilidade do solo, o que facilitou a absorção desses nutrientes no sistema radicular, evitando o antagonismo iônico comum em sistemas adubados quimicamente. As BPCPs, tal como a *Azospirillum*, podem favorecer a absorção de cátions via ativação de bombas de prótons (H^+ - ATPases) nas membranas do sistema radicular (Hungria *et al.*, 2021; Pardo-Díaz *et al.*, 2021).

Figura 13 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na biomassa do capim na safra de 2024.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os valores numéricos indicam o coeficiente de correlação (r). O asterisco (*) denota correlação estatisticamente significativa ($p < 0,05$). A escala de cores representa a intensidade da associação, variando de -1 (vermelho) a 1 (azul). Ncapim, Pcapim, Kcapim, Cacapim, Mgcapim e Scapim representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre.

O teor de P teve correlação positiva com o N ($r = 0,38$) e o S ($r = 0,42$), tornando evidente que o acúmulo de nutrientes no capim Piatã obteve maior estabilidade e interdependência no ciclo subsequente ao manejo biológico (Figura 12). A inoculação dos microrganismos estimula o crescimento radicular e aumenta a capacidade de absorver nutrientes, além de auxiliar na FBN resultando em maior desenvolvimento foliar. A *Azospirillum* inoculada no capim Paiaguás, promove o incremento da massa seca total, massa verde e número de perfis, principalmente na presença de fertilizantes nitrogenados (Bezerra *et al.*, 2025).

Não foram detectadas correlações negativas significativas em ambas as safras, o que demonstra a ausência de antagonismos iônicos severos nas estratégias de inoculação testadas na soja antecessora (Figura 12 e Figura 13).

7.2.2.3 Parâmetros de produtividade da palhada dos capins

As estratégias de manejo biológico da soja influenciaram a produção de biomassa de forma mais acentuada no primeiro ano de implantação, com respostas distintas entre os componentes avaliados (Tabela 12).

Na safra de 2023, a Inoculação 3 associada à inoculação adicional da soja (Fator 2) destacou-se com a maior produção de massa verde de capim Piatã (14275 kg ha⁻¹), superando as demais combinações, com exceção da Inoculação 1, com inoculação adicional. Para a massa seca de capim no mesmo período, as estratégias de Inoculação 3 (Fatores 1 e 2) apresentaram os maiores rendimentos, diferindo dos tratamentos sob Inoculação 1, 2 e 4. Esse resultado pode ser atribuído aos efeitos sinérgicos dos microrganismos inoculados afetando a nutrição e crescimento da planta, com o *Bradyrhizobium* atuando na FBN e disponibilizando o N para a planta em sucessão (Musyoka *et al.*, 2020; Patil *et al.*, 2017) e a *Azospirillum* por sua vez, atuou no crescimento da planta por meio da estimulação do crescimento radicular que impacta positivamente na absorção de nutrientes e água (Hungria *et al.*, 2013; Glaucia *et al.*, 2017), sendo a aplicação da *Azospirillum* na região do sulco de semeadura um potencializador da ação perto das raízes, facilitando o processo de interação e colonização, mesmo no capim em sucessão à soja.

Quanto à produção de palhada no mesmo ano, o tratamento 4.2 foi destaque positivo para a massa verde e massa seca, com valores homogêneos independentemente do tratamento. A coinoculação do tratamento 4.2, na soja,

influenciou em uma simbiose mais eficiente, maior fixação de nitrogênio e consequentemente maior vigor na palhada do capim Piatã. A coinoculação favorece o crescimento e nodulação das plantas e maior acúmulo de biomassa (Hungria *et al.*, 2013; Chibeba *et al.*, 2015).

No ciclo de 2024, observou-se uma uniformização entre os tratamentos para as variáveis de massa verde e seca do capim Paiaguás, indicando que o efeito das inoculações na soja sobre o crescimento da forragem foi atenuado (Tabela 12). A ausência de chuvas no período da safra do consórcio (Figura 2B), pode ter impactado na produção do capim, que não respondeu ao efeito residual da inoculação da soja, além disso, o SPD consolidado da área e a grande quantidade de palhada na superfície do solo pode não ter disponibilizado nutrientes na fase de maior demanda para o crescimento do capim.

Além disso, observa-se que o resultado também tem ligação direta com a população do sorgo, onde o sorgo tem POP com valores mais altos, ou seja, o sorgo fecha mais o stand e o capim cresce com menos força por que entra menos luz. Na tabela do POP do sorgo, a população do sorgo 1.1 foi menor e do 4.2 a POP do sorgo foi maior.

Tabela 12 – Médias de massa verde e seca dos capins Piatã e Paiaguás e palhada do capim remanescente sob diferentes estratégias de efeito residual da inoculação e inoculação adicional, respectivamente nas safras de 2023 e 2024.

(Continua)

Médias de Massa Verde e Seca						
Ano Safr	Inoc	Fator	Capim		Palhada	
		Inoc Adic	Massa verde (kg ha ⁻¹)	Massa seca (kg ha ⁻¹)	Massa verde (kg ha ⁻¹)	Massa seca (kg ha ⁻¹)
2023	1	1	10705 ^b	2726 ^b	8832 ^{ab}	3792 ^a
		2	12355 ^{ab}	3768 ^{ab}	8242 ^{ab}	3326 ^a
	2	1	11155 ^b	3361 ^b	7330 ^b	3897 ^a
		2	11312 ^b	3688 ^{ab}	8115 ^{ab}	3727 ^a
	3	1	10512 ^b	4758 ^a	8112 ^{ab}	3511 ^a
		2	14275 ^a	4678 ^a	8800 ^{ab}	3098 ^a
	4	1	10090 ^b	3113 ^b	8402 ^{ab}	4032 ^a
		2	10747 ^b	3272 ^b	9817 ^a	4049 ^a

Médias de Massa Verde e Seca						
Ano Safr	Inoc	Fator	Capim		Palhada	
		Inoc Adic	Massa verde (kg ha ⁻¹)	Massa seca (kg ha ⁻¹)	Massa verde (kg ha ⁻¹)	Massa seca (kg ha ⁻¹)
2024	1	1	10677 ^a	2953 ^a	12855 ^{ab}	2867 ^{ab}
		2	8890 ^a	2430 ^a	10855 ^b	1934 ^b
	2	1	6175 ^a	1736 ^a	11565 ^b	2378 ^{ab}
		2	5005 ^a	1387 ^a	15535 ^{ab}	2868 ^{ab}
	3	1	7170 ^a	2217 ^a	17320 ^{ab}	3396 ^{ab}
		2	9167 ^a	2833 ^a	19355 ^a	3921 ^a
	4	1	6442 ^a	1903 ^a	14557 ^{ab}	2731 ^{ab}
		2	4502 ^a	1365 ^a	16752 ^{ab}	2921 ^{ab}

(conclusão)

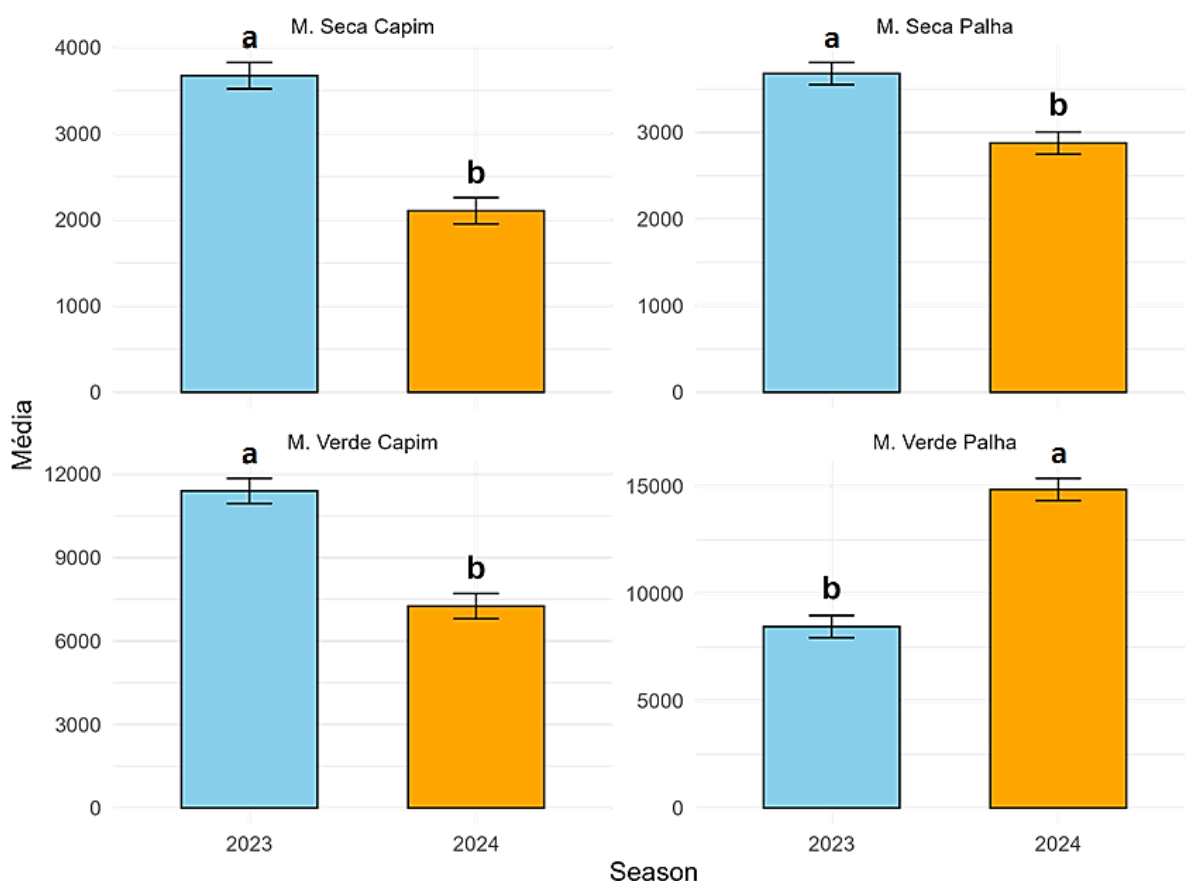
Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

Entretanto, para a palhada, a Inoculação 3 (Fator 2) manteve patamares elevados de massa verde (19355 kg ha⁻¹), e seca (3921 kg ha⁻¹). Pode-se notar, que a coinoculação de *Bradyrhizobium* com a *Azospirillum* sem inoculação adicional na soja, ambos atuando na FBN e promovendo o crescimento das plantas, respectivamente, determina que a ação conjunta pode ter gerado nodulação precoce, maior biomassa de raízes e parte aérea consequentemente, maior residual de N no solo após a colheita da soja, que beneficia o capim Paiaguás em sucessão (Chibeba *et al.*, 2015; Glaucia *et al.*, 2017).

A análise comparativa interanual revelou um contraste significativo na dinâmica de deposição de biomassa entre os anos (Figura 14).

Figura 14 – Comparação interanual (2023 vs. 2024) da produção de massa seca e verde de capim/palhada.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: As barras representam a média geral dos tratamentos para cada ano agrícola. Letras diferentes sobre as barras indicam variação estatística significativa entre as safras pelo teste de comparação de médias ($p < 0,05$).

Verificou-se redução acentuada na produção de massa verde e seca do capim Paiaguás na safra de 2024 em comparação à safra do capim Piatã em 2023. Este fato se refere ao efeito concentração, que ocorre quando a taxa de absorção dos nutrientes supera a taxa de acúmulo de matéria seca. As BPCP regulam a eficiência de uso dos nutrientes, permitindo que a planta mantenha um estado nutricional elevado mesmo sob menor crescimento vegetativo, o que é essencial para a qualidade da forragem (Heinrichs *et al.*, 2020; Pardo-Díaz *et al.*, 2021).

No entanto, vale ressaltar que, os menores valores de massa verde e seca do capim Paiaguás de 2024 podem ser decorrentes da maior competição com o sorgo granífero utilizado no consórcio, onde a redução da disponibilidade de água (Figura

2B), luz e nutrientes interferiram diretamente no desenvolvimento do capim, sendo estes resultados, diferem dos obtidos por Santos (2017).

De forma análoga, a massa seca da palhada apresentou declínio no segundo ano. Contudo, observou-se que houve incremento significativo na massa verde da palhada em 2024 (19.355 kg ha⁻¹), no tratamento *Bradyrhizobium* inoculado na semente e o *Azospirillum* adicionado no sulco de semeadura, sem inoculação adicional (Figura 14).

Esse padrão sugere que, embora o rendimento final de massa seca tenha sido inferior na segunda safra, houve uma maior manutenção de umidade ou um aporte diferenciado de material fresco (verde) na superfície do solo por meio de da colheita do sorgo, que alterou a estrutura de cobertura morta no consórcio, sendo que esse material foi degradado pelos microrganismos e gerou na maior taxa de ciclagem de nutrientes, sendo fundamental para o sucesso das culturas subsequentes no SPD (Figura 14).

7.2.3 Considerações finais

O tratamento controle com inoculação adicional na soja, se destacou e influenciou significativamente a produtividade de grãos de sorgo, que alcançou 5.186 kg ha⁻¹ na safra de 2023, com incrementos em relação aos demais tratamentos. Na safra de 2024, apesar do estresse hídrico, a cultura demonstrou alta plasticidade ao manter estável a Massa Seca da Panícula (MSP), atingindo 4456 kg ha⁻¹ quando a *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense* inoculadas juntas nas sementes de soja, o que comprova o papel auxiliador dos microrganismos no incremento produtivo das culturas em sucessão à soja.

Em relação à nutrição dos capins, houve efeito na concentração de nutrientes ao longo do tempo. Na safra de 2024, verificou-se incremento nos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) em comparação ao ano de 2023, impulsionado pela melhoria da fertilidade do solo e pelo efeito residual das inoculações realizadas no período experimental.

A produtividade de fitomassa foi potencializada pela coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*, com a maior produção de massa verde do capim (14.275 kg ha⁻¹) em 2023, além de manter alta produtividade da palhada em 2024 (19.355 kg ha⁻¹ de massa verde). Esse acúmulo contínuo de restos culturais é

fundamental para a manutenção da cobertura morta do SPD, garantindo maior ciclagem de nutrientes e proteção térmica do solo, mesmo quando a produção de massa seca é reduzida por estresse hídrico ou competição interespecífica no consórcio de plantas (sorgo e capim).

Desse modo, as estratégias de inoculação e inoculação adicional na soja antecessora foram ferramentas essenciais para incrementar a produtividade do sorgo e nutricional dos capins. A inoculação dos microrganismos promoveu estabilidade produtiva, garantindo um sistema de produção mais resiliente, com maior vigor vegetativo e com maior ciclagem de nutrientes via palhada, essencial para o sucesso da cultura em sucessão (soja).

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. A. et al. Acúmulo de nutrientes nas folhas e produção do capim Tamani inoculado com *Azospirillum brasilense*. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 17, n. 2, p. 77-85, 2022. ISSN-e 1981-8203
- BASHAN, Y. et al. How the Plant Growth-Promoting Bacterium *Azospirillum* Promotes Plant Growth—A Critical Assessment. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 77-136, 2010. DOI:[10.1016/S0065-2113\(10\)08002-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08002-8)
- BEZERRA, G. M. O. et al. Productive Performance of *Brachiaria brizantha* cv. Paiaguás in Response to Different Inoculation Techniques of *Azospirillum brasilense* Associated with Nitrogen Fertilization in the Brazilian Amazon. **Nitrogen**, Basel, v. 6, n. 2, p. 47, 2025. DOI:[10.3390/nitrogen6020047](https://doi.org/10.3390/nitrogen6020047).
- BORÉM, A.; PIMENTEL, G. V.; PARRELLA, R. A. C. Sorgo: do plantio à colheita. Viçosa: Editora UFV, 2014. 256 p.
- BULEGON, L. G. et al. Growth and gas exchange in the vegetative period of soybean inoculated with bacteria diazotrophic. **Revista Nativa**, n. 4, p. 277-286, 2016.
- CHIBEBA, A. M.; GUIMARÃES, M. de F.; BRITO, O. R.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Co-Inoculation of Soybean with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* Promotes Early Nodulation. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 10, p. 1641–1649, 2015. DOI:[10.4236/ajps.2015.610164](https://doi.org/10.4236/ajps.2015.610164)
- CREUS, C. M. et al. Plant Growth-Promoting Effects of Rhizobacteria on Abiotic Stressed Plants. *Azospirillum*-Grasses Model. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology**, v. 4, n. 1, p. 49-59, 2010.
- DARTORA, J. et al. Adubação nitrogenada associada à inoculação com *Azospirillum brasilense* e *Herbaspirillum seropedicae* na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 10, p. 1023–1029, 2013. DOI:[10.1590/S1415-43662013001000001](https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001000001)
- EUCLIDES, V. P.; MONTAGNER, D. P.; BARBOSA, A. R.; VALLE, C. B.; NANTES, N. N. Animal performance and sward characteristics of two cultivars of *Brachiaria brizantha* (BRS Paiaguás and BRS Piatã). **R. Bras. Zootec.**, v. 45, n. 3, p. 85-92, 2016. DOI:[10.1590/S1806-92902016000300001](https://doi.org/10.1590/S1806-92902016000300001)
- FERRI, G. C. et al. Effects of associated co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* with *Azospirillum brasilense* on soybean yield and growth. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 1, p. 6-11, 2017. DOI:[10.5897/AJAR2016.11711](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11711)
- GLAUCIA, C. F.; ALESSANDRO, L. B.; FERNANDA, B. G. A.; LUCAS, C. P. Effects of associated co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* with *Azospirillum brasilense* on soybean yield and growth. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 1, p. 6–11, 2017. DOI: [10.5897/ajar2016.11711](https://doi.org/10.5897/ajar2016.11711).

HEINRICHS, R. et al. *Azospirillum* inoculation of 'Marandu' palisade grass seeds: effects on forage production and nutritional status. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 41, n. 2, p. 465-478, 2020. DOI: 10.5433/1679-0359.2020v41n2p465

HUNGRIA, M. et al. Seed and leaf-spray inoculation of PGPR in brachiarias (*Urochloa* spp.) to improve plant growth, forage yield and nutrient status. **Plant and Soil**, v. 463, p. 171-186, 2021. DOI 10.1007/s11104-021-04908-x

HUNGRIA, M., NOGUEIRA, M.A., ARAUJO, R.S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. **Biol Fertil Soils**, v. 49, p. 791–801, 2013. DOI:10.1007/s00374-012-0771-5

KOCHAR, M. et al. Surface colonization by *Azospirillum brasilense* SM in the indole-3-acetic acid dependent growth improvement of sorghum. **Journal of Basic Microbiology**, v. 52, n. 2, p. 123-131, 2012. DOI: 10.1002/jobm.201100038.

MACHACULEHA, A. FÁTIMA GUIMARÃES, M. D.; RODRIGUES BRITO, O.; NOGUEIRA, M. A.; SILVA ARAUJO, R.; HUNGRIA, M. Co-Inoculation of Soybean with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* promotes early nodulation. **American Journal of plant sciences**, V. 6, n. 10, 2015. DOI: 10.4236/ajps.2015.610164

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Fisiologia do Sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Comunicado Técnico, 86). ISSN 1679-0162

MALHOTRA, M.; SHARMA, S. Targeted engineering of *Azospirillum brasilense* SM with indole acetamide pathway for indoleacetic acid over-expression. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 11, p. 1078-1084, 2006. DOI: 10.1139/w06-071.

MUSYOKA, D. M.; NJERU, E. M.; NYAMWANGE, M. M.; MAINGI, J. M. Arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium* co-inoculation enhances nitrogen fixation and growth of green grams (*Vigna radiata* L.) under water stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 7, p. 1036–1047, 2020. DOI: 10.1080/01904167.2020.1711940.

PARDO-DÍAZ, S. et al. Endophytic PGPR Improves Plant Growth and Quality and modulates the bacterial Community of an Intercropping System. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, p. 1-12, 2021. DOI:10.3389/fsufs.2021.715270

PATIL, A.; KALE, A.; AJANE, G.; SHEIKH, R.; PATIL, S. Plant Growth-Promoting *Rhizobium*: Mechanisms and Biotechnological Prospective. In: Hansen, A., Choudhary, D., Agrawal, P., Varma, A. (eds) *Rhizobium Biology and Biotechnology*. **Soil Biology**, v. 50. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-64982-5_7

QUEIROZ REGO, C. H; CARDOSO, F. B.; CÂNDIDO, A. C.; TEODORO, P. E.; ALVES, C. Z. Co-inoculation with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* Increases Yield and Quality of Soybean Seeds. *Agronomy Journal*, v. 110, Issue 6, p. 2302-2309, 2018. DOI:10.2134/agronj2018.04.0278

RONDINA, A. B. L.; DOS SANTOS SANZOVO, A. W.; GUIMARÃES, G. S.; WENDLING, J. R.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*

or treated with *A. brasilense* exudates. **Biolooy and Fertility of Soils**, v. 56, p. 537-549, 2020. DOI:10.1007/s00374-020-01453-0

SAMPAIO, F. A. R. et al. Nitrogen supply associated with rhizobacteria in the first productive cycle of Marandu grass. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 24, n. 4, 2021. DOI:10.1007/s12892-021-00091-8

SANTANA, I.A. et al. Yield and nutritional value of sorghum genotype silages using *Azospirillum brasilense* in the northern region of the state of Minas Gerais. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 4, p. 1721-1738, 2022. DOI: 10.5433/1679-0359.2022v43n4p1721

SANTOS, C.B. **Consórcio do sorgo granífero com capim paiaguás na recuperação de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária**. Tese, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, p. 93, 2017.

SCHUMACHER, F. G. et al. Effect of inoculation of seeds with *Azospirillum brasilense* on nitrogen and glycidic fractionation in sorghum silagens. **Agrarian and Biological Sciences**, v. 10, n. 2, e12321, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i2.12321

SOARES, D. A. et al. Soybean Yield and Nutrition Grown on the Straw of Grain Sorghum Inoculated with *Azospirillum brasilense* and Intercropped with BRS Paiguás Grass. **Plants**, v. 12, n. 10, 2007, 2023. DOI: 10.3390/plants12102007

THAKARE, G. V. et al. Quantifying response of *Azospirillum* and phosphate solubilizing bacteria liquid inoculants seed treatment on productivity and profitability of kharif grain sorghum (*Sorghum bicolor*). **Indian Journal of Agronomy**, v. 69, n. 1, p. 48-53, 2024. DOI: 10.59797/ija.v69i1.5481

THEWAGE, S. N. P. **Investigation of enhancement of growth in Sorghum bicolor by inoculation with plant growth-promoting microbes**. 2021. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Saint Mary's University, Halifax, 2021.

7.3 CAPÍTULO 3- ANÁLISES DA SOJA

7.3.1 Teor de nutrientes foliar

A análise foliar da soja ao longo de três anos agrícolas revelou que as absorções de macronutrientes foram predominantemente influenciadas pelas condições anuais de cultivo e cultivares, com pouca variação em resposta às estratégias de inoculação e inoculação adicional (Tabela 13).

Nas safras de 2023 e 2024, não foram detectadas diferenças ($p > 0,05$) entre os tratamentos para nenhum dos nutrientes avaliados, indicando que independentemente de qual bactéria utilizada, tipo de inoculação, condição climática e manejo de rotação/sucessão de culturas, o fornecimento nutricional foi equilibrado e homogêneo, e o solo pode ter atingido equilíbrio nutricional alto (Tabela 6 e 7), sendo teores adequados para o desenvolvimento da soja, reduzindo a resposta aos microrganismos inoculados.

Essa homogeneidade ocorre frequentemente em sistemas com histórico consolidado de cultivo de soja. Nessa situação, a população de *Bradyrhizobium* nativa ou pré-estabelecida promove forte pressão competitiva sobre os novos inoculantes, o que tende a homogeneizar os teores de nutrientes foliares, especialmente em anos com condições climáticas favoráveis (Jarecki; Buczek; Jańczak-Pieniżek, 2020; Wei *et al.*, 2023).

Ademais, os teores de N, P, K estão dentro da faixa de suficiência nutricional (38,6-45,7 g/kg, 3,1-3,7 g/kg, 18,3-20,7 g/kg), respectivamente, em todas as safras e tratamentos avaliados, e o Ca está abaixo do nível crítico (8,7-10,3 g/kg) na safra de 2025 e em 2023/24, sendo os teores considerados dentro da faixa de suficiência (9,4-11,3 g/kg). O Mg no ano de 2023 e 2025, estão abaixo do nível crítico (4,4-5,3 g/kg), porém em 2024 observa-se uma melhora nos teores foliares, sendo todos os tratamentos dentro da faixa de suficiência (4,4-5,3 g/kg). Quanto aos teores da safra de 2023, o S está abaixo do nível crítico (2,1-2,4 g/kg) e nas demais safras, os teores estão concentrados dentro da faixa de suficiência (2,1-2,7 g/kg) independentemente dos tratamentos avaliados (de Souza *et al.*, 2020).

Nota-se que em dezembro, período da coleta foliar ocorreu o maior índice pluviométrico (Figura 2C) (aproximadamente 300 mm), isso pode ter sensibilizado os microrganismos, anulando seus efeitos nos demais tratamentos. Embora o sistema

seja resiliente, variações na eficiência da solubilização de fósforo ou alterações na arquitetura radicular induzidas por diversas cepas de bactérias podem não manifestar-se sob condições de maior estresse ou conforme o sistema de integração se consolida (Syromiatnykov, 2025).

Tabela 13 – Teores de macronutrientes no tecido vegetal (folhas) da soja sob diferentes estratégias de inoculação nas safras de 2023, 2024 e 2025, antes da inoculação adicional de *Bradyrhizobium* em R1 da soja.

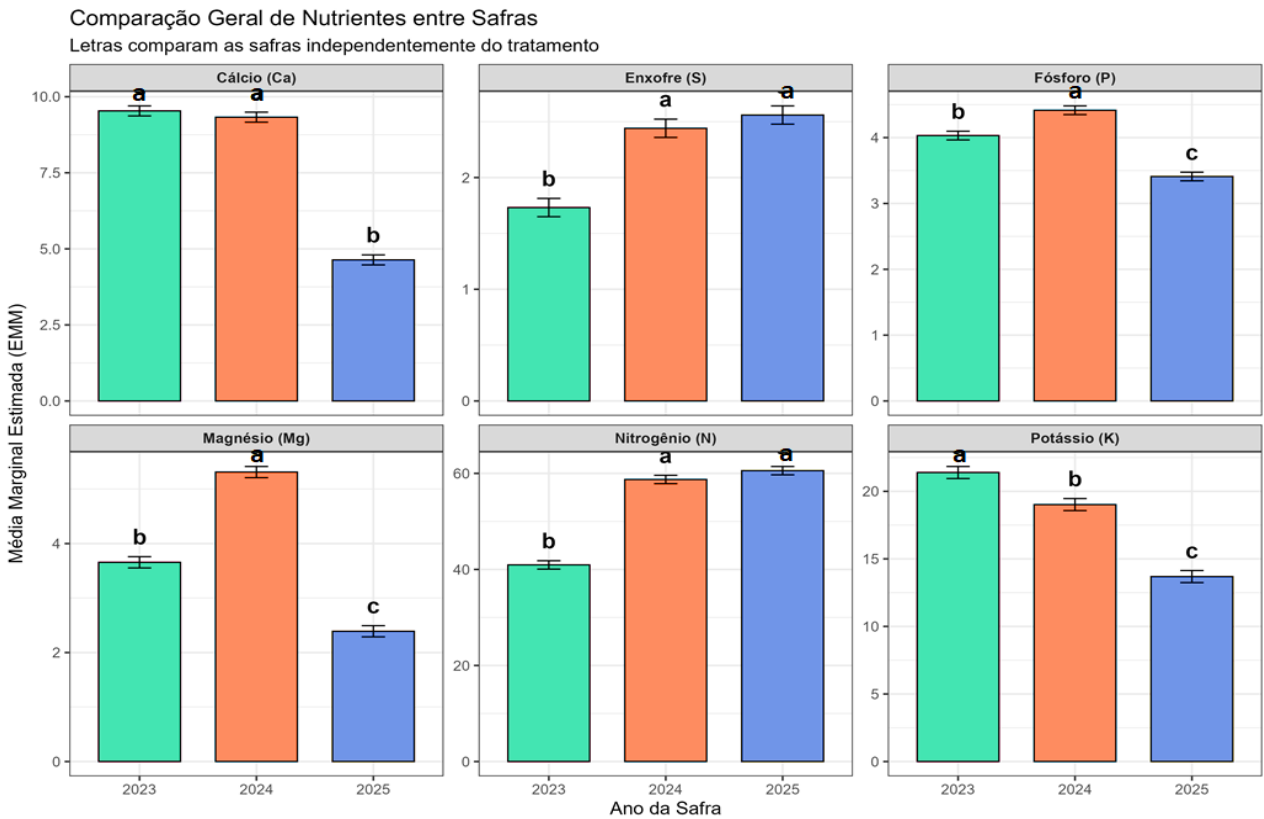
(Continua)								
Análise foliar								
Ano Safr	Inoculação	Fator Inoc Adic	Nutrientes					
			N	P	K	Ca	Mg	S
2023	1	1	37,5 ^a	4,6 ^a	18,95 ^a	8,65 ^a	3,32 ^a	1,82 ^a
		2	34,7 ^a	4,3 ^a	18,35 ^a	8,72 ^a	3,32 ^a	1,92 ^a
	2	1	41,9 ^a	4,1 ^a	23,15 ^a	9,87 ^a	3,77 ^a	1,80 ^a
		2	39,3 ^a	4,1 ^a	22,55 ^a	9,72 ^a	3,70 ^a	1,62 ^a
	3	1	48,2 ^a	3,9 ^a	21,57 ^a	10,25 ^a	3,95 ^a	1,70 ^a
		2	44,4 ^a	3,7 ^a	20,80 ^a	10,35 ^a	4,27 ^a	1,60 ^a
	4	1	40,6 ^a	3,7 ^a	23,92 ^a	9,37 ^a	3,55 ^a	1,57 ^a
		2	40,9 ^a	3,9 ^a	21,85 ^a	9,32 ^a	3,35 ^a	1,80 ^a
2024	1	1	57,4 ^a	4,3 ^a	18,62 ^a	9,62 ^a	5,50 ^a	2,67 ^a
		2	59,3 ^a	4,5 ^a	18,97 ^a	9,00 ^a	5,40 ^a	2,17 ^a
	2	1	59,3 ^a	4,4 ^a	18,77 ^a	9,52 ^a	5,27 ^a	2,25 ^a
		2	59,5 ^a	4,4 ^a	18,72 ^a	9,55 ^a	5,32 ^a	2,40 ^a
	3	1	59,9 ^a	4,4 ^a	18,75 ^a	9,52 ^a	5,37 ^a	2,42 ^a
		2	57,9 ^a	4,6 ^a	18,82 ^a	9,85 ^a	5,32 ^a	2,45 ^a
	4	1	58,7 ^a	4,3 ^a	19,57 ^a	8,80 ^a	5,12 ^a	2,60 ^a
		2	57,9 ^a	4,5 ^a	19,90 ^a	8,75 ^a	5,17 ^a	2,55 ^a
2025	1	1	58,4 ^a	3,70 ^a	13,87 ^a	4,32 ^a	2,05 ^a	2,75 ^a
		2	61,9 ^a	3,47 ^{ab}	16,07 ^a	5,37 ^a	2,42 ^a	2,47 ^a
	2	1	61,2 ^a	3,57 ^{ab}	13,97 ^a	5,12 ^a	2,72 ^a	2,05 ^a
		2	59,0 ^a	3,25 ^b	14,65 ^a	5,45 ^a	2,82 ^a	2,75 ^a
	3	1	61,8 ^a	3,32 ^{ab}	13,07 ^a	4,52 ^a	2,80 ^a	2,62 ^a
		2	59,3 ^a	3,35 ^{ab}	12,97 ^a	4,32 ^a	2,52 ^a	2,35 ^a
	4	1	62,1 ^a	3,27 ^b	12,95 ^a	4,05 ^a	1,90 ^a	2,52 ^a

Análise foliar								
Ano Safr	Inoculação	Fator Inoc Adic	Nutrientes					
			N	P	K	Ca	Mg	S
		2	61,0 ^a	3,32 ^{ab}	11,95 ^a	3,92 ^a	1,87 ^a	2,95 ^a
(Conclusão)								

Fonte: produção da própria autora.
Legenda: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). N, P, K, Ca, Mg e S representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre, respectivamente (g/kg). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

A análise comparativa entre as safras demonstrou oscilações significativas na análise nutricional da cultura (Figura 15).

Figura 15 – Comparação interanual (2023, 2024 e 2025) dos teores médios de macronutrientes foliares da soja.



Fonte: produção da própria autora.
Legenda: As barras representam a média marginal estimada (EMM) de todos os tratamentos para cada ano agrícola. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença estatística significativa entre as safras ($p < 0,05$).

Um dos resultados mais expressivos desta pesquisa foi que o Nitrogênio e o

Enxofre apresentaram incrementos, atingindo seus maiores teores nas safras de 2024 e 2025, superando os valores obtidos na safra de 2023 (Figura 15). Esse resultado é proveniente do efeito benéfico acumulativo da FBN no solo e das inoculações e inoculações adicionais na fixação e absorção desses nutrientes, ao longo do tempo.

A inoculação realizada de forma continuada estimula a massa nodular e a quantidade de N proveniente da atmosfera, promovendo o acúmulo de reservas de N e S orgânicos no solo, que os torna, gradualmente disponíveis (Namozov *et al.*, 2022). Dessa forma, o incremento de S para as plantas é vital, uma vez que este, atua em sinergia com o N, sendo componente essencial da enzima nitrogenase e essencial para a atividade metabólica dos rizóbios (Hu *et al.*, 2023). A obtenção de altos teores de N e S reflete, portanto, evolução positiva na qualidade microbiológica do sistema e na eficiência metabólica da cultura sob manejo de longo prazo.

Em contraste, os teores de Potássio, Cálcio e Magnésio exibiram tendência de declínio na safra de 2025 em comparação aos anos anteriores (Figura 15). Houve redução do fósforo no ciclo de 2025 em comparação à 2024, retornando a valores próximos ao ano inicial (2023) (Figura 15). Tais variações indicam que, apesar da estabilidade promovida pelos tratamentos biológicos dentro de cada safra, fatores extrínsecos ao manejo, tal como, clima, rotação/sucessão de culturas, incremento de material vegetal na superfície do solo, tempo de condução experimental e SPD influenciaram a dinâmica de acúmulo de bases e fósforo na folha da soja no longo dos anos (Figura 15).

Variações climáticas que ocorrem no decorrer dos anos, tal como o índice pluviométrico, podem intensificar processos de perda de bases em solos de clima tropical, especialmente durante períodos de alta demanda hídrica (Lynrah; Nongmaithem, 2017). Além disso, o incremento na produtividade da soja e o consequente acúmulo de biomassa das safras anteriores na superfície do solo, podem ter auxiliado uma maior exportação nutricional, gerando redução temporária na disponibilidade imediata destes elementos no solo, exigindo ajuste na fertilização mineral de reposição para evitar o esgotamento das reservas no solo (Singh; Najjar; Akhtar, 2009).

7.3.2 Correlações da análise nutricional foliar das safras de 2023-2025

A análise das matrizes de correlação de Pearson permitiu identificar a dinâmica de interações estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre os macronutrientes ao longo dos três anos de condução experimental, tornando evidente as variações significativas (Figura 16, 17 e 18).

No ano de 2023, observou-se forte sinergismo entre os cátions, com destaque para a correlação positiva e forte entre Cálcio e Magnésio ($r = 0,91$) essa relação ocorreu em virtude das características químicas e interação entre esses elementos, pois apresentam dinâmica semelhante no solo, competindo por locais de trocas catiônicas e funcionamento das membranas celulares, levando à absorção e acúmulo nos tecidos das plantas (Nimnoi *et al.*, 2014). O Potássio também apresentou associações positivas com o Magnésio ($r = 0,39$) e com o Cálcio ($r = 0,44$).

Adicionalmente, o N exibiu associação positiva com o Cálcio ($r = 0,38$), e esse comportamento reflete na interação entre o papel do cálcio na sinalização celular e a estabilização das membranas, aliado ao metabolismo do nitrogênio pela presença de *Bradyrhizobium*, pois são elementos essenciais para o crescimento saudável da planta fixadora de nitrogênio (Nimnoi *et al.*, 2014). Enquanto o Fósforo correlacionou-se positivamente com o Enxofre ($r = 0,68$), que demonstra a relação conjunta destes nutrientes que promovem a síntese proteica e processos metabólicos.

Figura 16 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na folha da soja na safra de 2023.

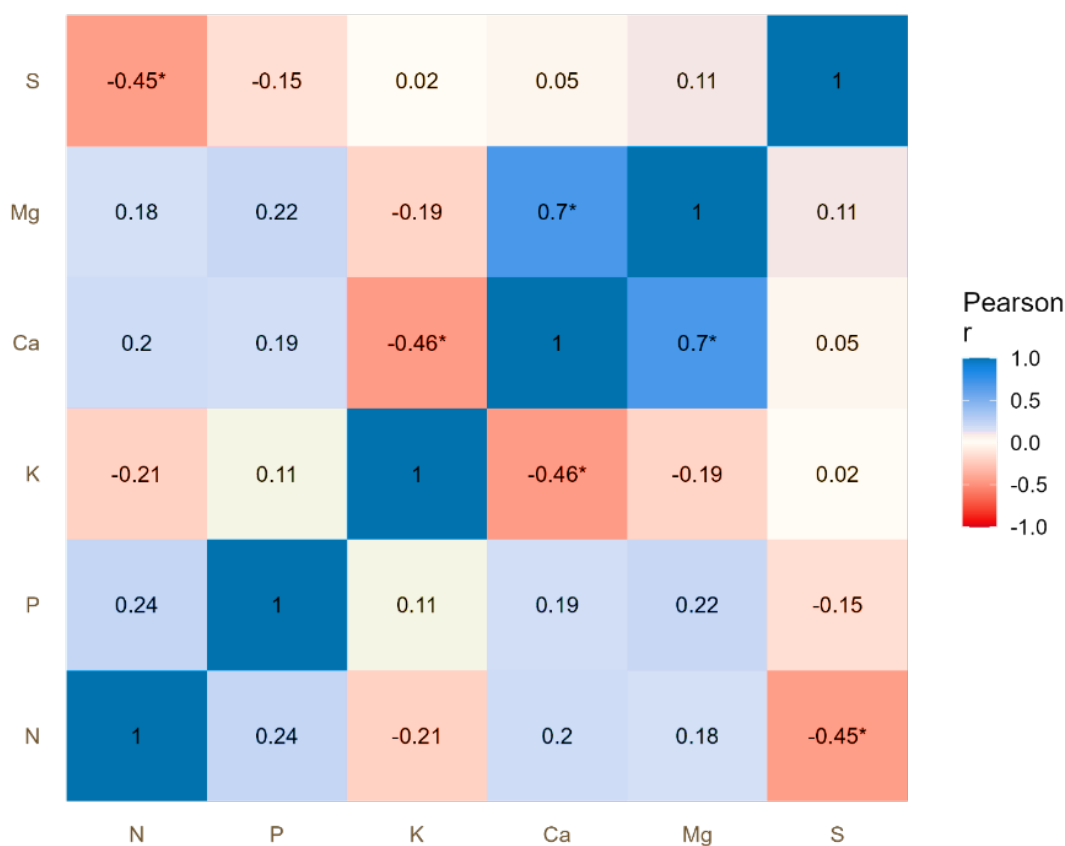


Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os valores numéricos indicam o coeficiente de correlação (r). O asterisco (*) denota correlação estatisticamente significativa ($p < 0,05$). A escala de cores representa a intensidade da associação, variando de -1 (vermelho) a 1 (azul). N, P, K, Ca, Mg e S representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre, respectivamente.

Em contrapartida, houve antagonismos por meio das correlações negativas entre Potássio e Fósforo ($r = -0,44$), entre Nitrogênio e Enxofre ($r = -0,35$), e entre Enxofre e Potássio ($r = -0,53$) e entre Nitrogênio e Fósforo ($r = -0,40$). As relações negativas entre esses nutrientes podem ser resultado de competições química ou fisiológica que ocorrem no sistema radicular. Essa situação pode ser intensificada em Latossolos argilosos, onde as disponibilidades dos nutrientes são controladas por reações de trocas catiônicas e fixação em partículas de solo, impactando na mobilidade e absorção seletiva (Nimnoi *et al.*, 2014; (Chibeba *et al.*, 2015).

Figura 17 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na folha da soja na safra de 2024.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os valores numéricos indicam o coeficiente de correlação (r). O asterisco (*) denota significância estatística ($p < 0,05$). A escala de cores representa a intensidade da associação, variando de -1 (vermelho) a 1 (azul). N, P, K, Ca, Mg e S representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre, respectivamente

Em 2024 (Figura 17), a rede de relações mostrou novos padrões de interação. Houve destaque para a correlação positiva entre Cálcio e Magnésio ($r = 0,70$), sendo este sinergismo vital para a soja, visto que o Ca e Mg compartilham processos de absorção e transporte integrados (Wei *et al.*, 2023). Entretanto, o Nitrogênio manteve correlação negativa com o Enxofre ($r = -0,45$), em virtude da interação competitiva entre esses elementos na absorção e metabolismo da planta. Ambos são essenciais e fazem parte do metabolismo proteico, porém, a maior absorção ou disponibilidade pode impactar na redução ou mobilização do outro, resultando nas correlações negativa.

Em relação ao P, houve comportamento distinto em relação ao ano anterior, apresentando correlação negativa com o Ca ($r = -0,46$), esse fenômeno é proveniente

de complexação no solo e redução de absorção de ambos (Chibeba *et al.*, 2015; Takács *et al.*, 2018).

Na safra de 2025, observou-se a consolidação de fortes correlações positivas no complexo catiônico (Figura 18), especialmente entre Ca e Mg ($r = 0,72$). Verificou-se forte sinergismo entre o Ca e o K ($r = 0,87$), e o Mg também se correlacionou positivamente com o K ($r = 0,53$), reforçando a eficiência da cultura em otimizar a absorção de bases em sistema consolidado, visando manter o potencial osmótico e a integridade celular (Lynrah; Nongmaithem, 2017).

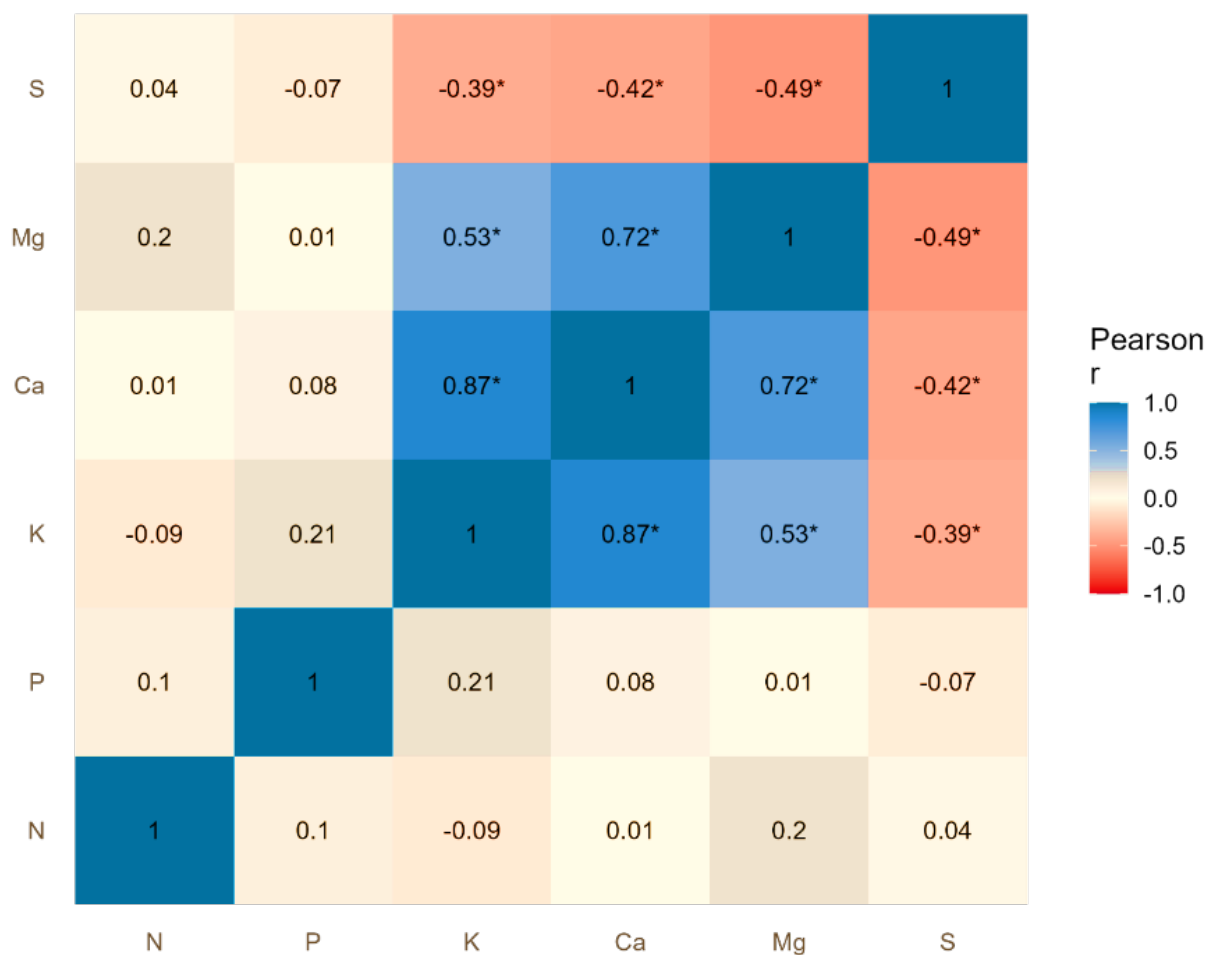
Por outra perspectiva, o S apresentou tendência antagonista com os cátions, relacionando-se negativamente com o Mg ($r = -0,49$), com o Ca ($r = -0,42$) e com o K ($r = -0,39$) (Figura 18). Embora o incremento de S seja essencial para a FBN, sua absorção na forma aniônica (SO_4^{2-}) pode promover competição por sítios de absorção ou desequilíbrios na neutralidade elétrica celular, evitando a entrada de cátions (Hu *et al.*, 2023). Este antagonismo ocorrido na última safra alerta para a necessidade de monitoramento da relação ânion-cátion, garantindo que o acúmulo de S não se torne um fator limitante para a absorção de bases essenciais ao enchimento de grãos.

Diferentemente dos anos anteriores, o Fósforo em 2025 não apresentou correlações significativas com o N, contrastando com o padrão de associação negativa observado no ciclo inicial de 2023 (Figuras 16).

Em uma análise geral das Figuras 16, 17 e 18 pode-se notar que a análise foliar da soja apresentou evolução na complexidade das interações iônicas. A transição de correlações negativas na safra de 2023 (como N e S, e N e P) para atuarem em sinergismo ou neutralidade nos anos seguintes, sugere-se que a estabilização do sistema promoveram ambiente químico mais equilibrado.

A persistência da correlação positiva e significativa entre Ca e Mg em todas as safras ($r = 0,91$; $0,70$; $0,72$) confirma a estabilidade do complexo de troca catiônica, essencial para a produção da soja. O forte sinergismo observado em 2025, entre Ca e K ($r = 0,87$), reforça a eficiência da planta em absorver bases em sistema consolidado, enquanto os antagonismos observados com o S no último ano apontam para a necessidade de monitoramento da partição deste nutriente para evitar limitações produtivas futuras.

Figura 18 – Matriz de correlação de Pearson entre os teores de macronutrientes na folha da soja na safra de 2025.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Os valores numéricos indicam o coeficiente de correlação (r). O asterisco (*) denota significância estatística ($p < 0,05$). A escala de cores representa a intensidade da associação, variando de -1 (vermelho) a 1 (azul). N, P, K, Ca, Mg e S representam os teores de Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre, respectivamente.

7.3.3 Análises do índice de clorofilas

Algumas estratégias de inoculação e o uso do fator adicional (inoculação adicional) impactaram significativamente nos teores de clorofila da soja em ambas as safras, tornando evidente as variações na eficiência da fotossíntese (Tabela 14).

Tabela 14 – Índices de clorofila a, b e total na cultura da soja em resposta a estratégias de inoculação e inoculação adicional nas safras de 2024 e 2025.

Médias de Clorofilas					
Ano	Inoc	Fator	Soja		
Safra		Inoc Adic	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila Total
2024	1	1	32,5 ^{ab}	15,2 ^{ab}	47,7 ^{ab}
		2	34,3 ^a	16,3 ^a	50,5 ^a
	2	1	31,0 ^b	12,8 ^b	43,7 ^b
		2	33,0 ^{ab}	14,0 ^{ab}	47,1 ^{ab}
	3	1	32,5 ^{ab}	14,0 ^{ab}	46,5 ^{ab}
		2	32,9 ^{ab}	15,0 ^{ab}	47,7 ^{ab}
	4	1	32,0 ^{ab}	14,7 ^{ab}	46,8 ^{ab}
		2	32,7 ^{ab}	13,7 ^{ab}	46,5 ^{ab}
2025	1	1	33,2 ^{ab}	15,0 ^b	48,2 ^{bc}
		2	33,9 ^a	14,3 ^b	48,3 ^{bc}
	2	1	32,8 ^{ab}	14,3 ^b	47,2 ^c
		2	33,4 ^{ab}	14,2 ^{bc}	47,7 ^c
	3	1	30,7 ^b	11,9 ^d	42,6 ^d
		2	33,1 ^{ab}	13,2 ^c	46,3 ^{cd}
	4	1	34,9 ^a	16,9 ^a	51,8 ^a
		2	35,1 ^a	16,8 ^a	52,0 ^a

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Clorofila A: índice de clorofila a; Clorofila B: índice de clorofila b; Clorofila T: índice de clorofila total. Os valores representam unidades relativas de clorofila. Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

Na safra de 2024, o tratamento sob Inoculação 1 associado à presença de inoculação adicional (Fator 2) proporcionou os maiores índices de clorofila a (34,3), b (16,25) e total (50,5), superando a Inoculação 2 (Fator 1), que apresentou os menores valores do período (Tabela 14). É notório que o tratamento que se destacou foi a presença dos microrganismos no solo, tornando necessário citar a relação deste fato com os teores de nutrientes foliares que estão presentes na Tabela 13.

Altas concentrações de macronutrientes da folha influenciam positivamente no

alto índice de clorofilas, pois estão diretamente envolvidas na síntese de clorofila, ou seja, quanto maior o índice de clorofilas, maior é o teor de nitrogênio, clorofila e consequentemente maior eficiência fotossintética. Essa relação está associada à influência que esses macronutrientes exercem na fotossíntese e consequentemente na saúde fisiológica da planta, por meio do crescimento vigoroso obtendo maior biomassa e incrementando na produtividade das culturas (Ebmeyer *et al.*, 2021).

Em relação a 2025, houve mudança no padrão de resposta dos tratamentos biológicos, tornando evidente que a bioestimulação via microrganismos diazotróficos pode alterar a eficiência da fotossíntese.

A Inoculação 4 foi destaque com os maiores teores de clorofila *a*, *b* e total, independentemente do fator de inoculação adicional, com valores de até 52,0 para clorofila total (Tabela 14). Em contrapartida, a Inoculação 3 (Fator 1) resultou nos menores índices de clorofila, indicando que, no segundo ano, a inoculação foi mais eficiente sobre o metabolismo da planta e na síntese de pigmentos foi dependente da estirpe ou manejo dos microrganismos (Tabela 14). Esse resultado pode ser atribuído à estabilização das populações microbianas no solo e à interação com variáveis edafoclimáticas (Figura 2C). A eficiência de estirpes de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* pode oscilar de acordo com a temperatura do solo e a pluviosidade, podendo afetar a nodulação de formas diferentes entre as safras (Kühling *et al.*, 2018).

Ademais, o incremento no índice de clorofilas sugere que a inoculação adicional fornece carga microbiana adicional para a planta, que pode potencializar o suprimento de nitrogênio via FBN. Visto que o nitrogênio é um componente estrutural da molécula de clorofila e integra enzimas fundamentais do ciclo de Calvin, como a Rubisco, o aumento no índice de clorofilas é um indicativo de saúde vegetal, e elevado potencial de carboxilação (Jarecki *et al.*, 2024).

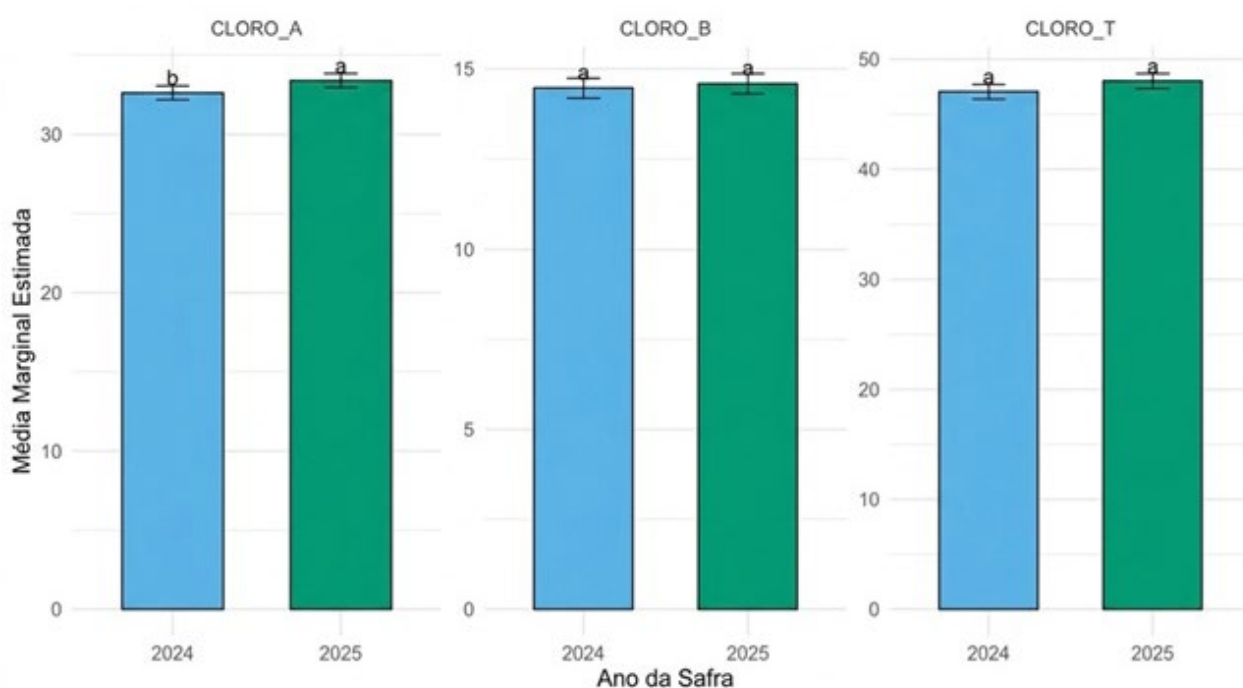
O baixo desempenho de alguns tratamentos na safra de 2025 demonstra a possibilidade de falhas no estabelecimento da simbiose ou na persistência microbiana que resultam na redução da eficiência fotossintética.

A análise comparativa interanual revelou que o status fisiológico da cultura tendeu à estabilidade ou ao incremento na segunda safra (Figura 19).

Verificou-se que o teor médio de clorofila *a* na safra de 2025 foi superior no ano de 2024, indicando evolução positiva do sistema solo-planta-bactérias, sendo este aumento uma adaptação fisiológica das plantas, possivelmente otimizando a captura de luz e incremento na eficiência no aproveitamento de nutrientes fornecidos pelo

sistema ao longo do tempo. O baixo desempenho de determinados tratamentos em 2024 reforça as falhas no estabelecimento da simbiose entre planta e bactérias, ou na persistência microbiana, que podem resultar em clorose e consequentemente na redução da eficiência fotossintética.

Figura 19 – Comparação interanual (2024 e 2025) dos teores médios de clorofila *a* (CLORO A), *b* (CLORO B) e total (CLORO T) na cultura da soja, em função dos anos de cultivo.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: As barras representam a média geral de todos os tratamentos por safra. Letras diferentes sobre as barras indicam diferença estatística significativa entre os anos agrícolas ($p < 0,05$).

No entanto, o índice de clorofila *b* e total apresentou tendência de igualdade em ambas as safras (Figura 19). Esse resultado entre os anos pode ser atribuído à estabilização das populações bacterianas no solo e à interação com variáveis edafoclimáticas (Figuras 2 B-C). A eficiência de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* pode oscilar de acordo com a temperatura do solo e a pluviosidade, impactando a nodulação de diferentes formas entre anos agrícolas (Kühling *et al.*, 2018).

A clorofila *a* é o pigmento principal dos centros de reação (fotossistemas I e II), e a clorofila *b* é o pigmento acessório, e atua nos complexos antena para capturar a luz. O aumento da relação *a/b* em 2025 sugere que houve adaptação da soja à maior irradiância ou otimização da arquitetura do dossel, na qual as plantas priorizam a

eficiência de conversão energética nos centros de reação em detrimento da área de captação (pigmentos antena).

Em SPD, há melhorias na saúde do solo e na disponibilidade de nutrientes, tal como o Mg que é o átomo central da molécula de clorofila, favorecendo dessa forma, a síntese da clorofila *a* e a manutenção do aparato fotossintético em estádios reprodutivos avançados da cultura (Suss, 2020; Silva *et al.*, 2020). Além disso, a coinoculação com *Azospirillum brasilense*, promove o desenvolvimento radicular, favorecendo a absorção de água e nutrientes, e consequentemente há maiores taxas de transporte de elétrons, protegendo os pigmentos contra a degradação precoce (Reina *et al.*, 2024). Portanto, o incremento da clorofila ocorrida em 2025 reflete um sistema mais resiliente e eficiente na ciclagem e aproveitamento do N fornecido pelas bactérias diazotróficas.

7.3.4 Análises de trocas gasosas

Os parâmetros de trocas gasosas da soja foram significativamente influenciados pelas estratégias de inoculação biológica e pelas condições ambientais de cada safra, revelando variações na capacidade fotossintética e na regulação hídrica entre os tratamentos (Tabela 15).

Na safra de 2024, o manejo sob Inoculação 4 (Fator 1) e 3 (Fator 2) destacaram-se com os maiores valores de taxa fotossintética (A) e transpiração (E) atingindo $39,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $8,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, superando o desempenho inferior observado na Inoculação 1 (Fator 1), em ambas análises, ou seja, houve incremento na fotossíntese e maior transpiração quando o *Bradyrhizobium* e a *Azospirillum* estavam coinoculadas e a ausência destes microrganismos na semeadura (tratamento controle) não impactou na fisiologia da soja. As BPCP atuam na planta de modo a melhorar os processos fisiológicos, especialmente a fotossíntese (Nascente *et al.*, 2017) e isso se deve a produção dos hormônios vegetais que podem atuar na absorção de nutrientes pelas plantas (Canellas *et al.*, 2015), como visto essa relação na análise foliar de nutrientes da Tabela 13 na safra de 2024.

Ademais, houve aumento significativo da transpiração visto na inoculação 3.2 em que, ambas bactérias coinoculadas favoreceram a maior quantidade de água perdida para a atmosfera na forma de vapor, em comparação aos demais tratamentos. Sendo a transpiração responsável pelas trocas gasosas entre o ambiente e planta, ela

auxilia no resfriamento da folha na presença de altas temperaturas, garantindo o funcionamento da fotossíntese, mesmo quando a enzima rubisco reduz sua atividade (Taiz e Zeiger, 2013).

Variáveis como Ci, Gs e WUE não apresentaram diferenças nesse ciclo, sugere-se que, as plantas tiveram mecanismos homeostáticos relativamente estáveis nos aspectos fisiológicos, e os efeitos das inoculações e inoculações adicionais em associação com os fatores ambientais, a resiliência fisiológica e a cultivar utilizada foram fatores insuficientes para promover alterações na soja.

Tabela 15 – Parâmetros fisiológicos de trocas gasosas na cultura da soja sob diferentes manejos de inoculação e inoculação adicional nas safras de 2024 e 2025.

Análises de trocas gasosas							
Ano Safr	Inocul.	Fator de Inoculação Adicional	Atributos avaliados				
			Ci	Gs	A	E	WUE
2024	1	1	193 ^a	493 ^a	30,9 ^b	7,0 ^b	4,2 ^a
		2	140 ^a	547 ^a	38,1 ^{ab}	7,3 ^{ab}	5,0 ^a
	2	1	202 ^a	523 ^a	33,1 ^{ab}	7,8 ^{ab}	4,0 ^a
		2	176 ^a	462 ^a	34,0 ^{ab}	7,9 ^{ab}	4,8 ^a
	3	1	179 ^a	561 ^a	37,3 ^{ab}	8,3 ^{ab}	4,5 ^a
		2	172 ^a	591 ^a	37,7 ^{ab}	8,4 ^a	4,4 ^a
	4	1	147 ^a	515 ^a	39,5 ^a	7,9 ^{ab}	4,5 ^a
		2	148 ^a	468 ^a	34,4 ^{ab}	7,8 ^{ab}	4,9 ^a
2025	1	1	189 ^b	660 ^a	36,5 ^{ab}	9,4 ^{bc}	3,9 ^{ab}
		2	180 ^b	700 ^a	39,5 ^a	10,7 ^{ab}	3,7 ^{ab}
	2	1	246 ^a	936 ^a	30,1 ^{ab}	9,3 ^{bc}	3,2 ^b
		2	215 ^{ab}	715 ^a	33,1 ^{ab}	10,7 ^{ab}	3,0 ^b
	3	1	252 ^a	787 ^a	27,3 ^b	8,7 ^{bc}	3,1 ^b
		2	199 ^b	702 ^a	35,6 ^{ab}	10,3 ^{ab}	3,4 ^b
	4	1	215 ^{ab}	719 ^a	33,3 ^{ab}	7,6 ^c	4,6 ^a
		2	195 ^b	770 ^a	38,8 ^{ab}	12,2 ^a	3,2 ^b

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna, dentro de cada safra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Ci: carbono interno ($\mu\text{mol mol}^{-1}$); Gs: condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); A: Taxa de fotossíntese líquida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); E: Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) WUE: Eficiência do uso da água ($\mu\text{molCO}_2 \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas

sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

No ciclo agrícola de 2025, a inoculação 4 (Fator 1 e 2) registrou a maior eficiência do uso da água (WUE) e transpiração (E), respectivamente. Em contrapartida, a Inoculação 2 e 3 (Fator 1) resultou na maior concentração interna de CO₂ (Ci), e com alta taxa fotossintética (A) com a inoculação 1.2 (Tabela 15). Quanto à transpiração (E), o valor máximo foi obtido na Inoculação 4 (Fator 2), com $12,25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, superando estatisticamente os demais tratamentos, enquanto que a condutância estomática não apresentou diferenças entre os tratamentos.

A coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* potencializa o fornecimento de nitrogênio via FBN e promove o crescimento das raízes por meio da produção de fitormônios, resultando em maior área foliar e síntese de enzimas fotossintéticas, como a Rubisco (Hungria *et al.*, 2015; Bulegon *et al.*, 2016). Esse incremento na fisiologia da planta explica a capacidade da Inoculação 4 em manter altas taxas de carboxilação. Além disso, quando associada ao Fator 2 (com inoculação adicional), este tratamento mostrou valor máximo de transpiração ($E = 12,25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), indicando uma planta com sistema radicular vigoroso capaz de sustentar fluxos hídricos elevados para manter o resfriamento foliar e a turgidez (Tabela 15).

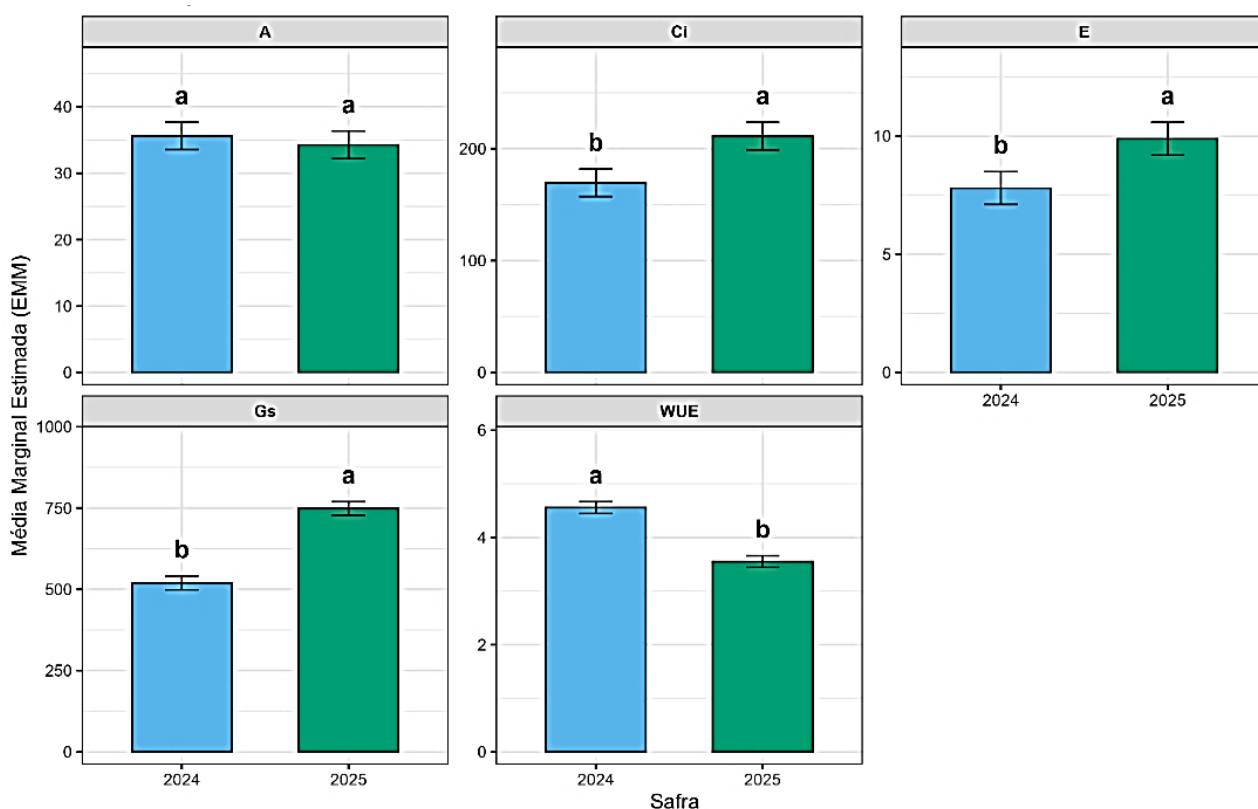
Observa-se uma situação crítica na Inoculação 3 (Fator 1), onde a combinação da maior concentração interna de CO₂ (Ci) com a menor taxa de fotossíntese ($27,35 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) sugere-se que houve limitação não-estomática da fotossíntese. Fisiologicamente, alto teor de Ci indica alto suprimento de CO₂ via estômatos, porém, o mesófilo está sendo incapaz de processar esse carbono. Segundo Suss (2020), essa situação é frequentemente associada à redução na eficiência de carboxilação da enzima Rubisco ou limitações no transporte de elétrons e regeneração de RuBP. Embora o manejo adotado no presente estudo tenha garantido a abertura estomática, houve comprometimento na fisiologia da fixação de carbono para este tratamento em específico, resultando em menor eficiência do uso da água (WUE) dentre os demais tratamentos (Tabela 15).

Quanto ao Gs, não houve diferenças entre os tratamentos, embora as bactérias diazotróficas são conhecidas por promoverem o crescimento e desenvolvimento da soja via FBN, podem não impactar diretamente ou imediatamente na regulação estomática em condições normais de cultivo, onde o estresse dos fatores ambientais não seja significativo. A coinoculação pode aumentar a produtividade, biomassa aérea

e a nodulação precoce, mas pode não impactar na condutância estomática, especialmente se a planta não apresenta restrições severas ou resposta fisiológica de ajuste estomático diferenciado em função dos tratamentos (Chibeba *et al.*, 2015; Marchão *et al.*, 2025). Ademais, os mecanismos fisiológicos que controlam a abertura dos estômatos e a condutância estomática podem ter permanecido constantes independente dos tratamentos, seja pela capacidade da planta em manter homeostase nas trocas gasosas ou pelo equilíbrio nas condições ambientais (Rondina *et al.*, 2020; Moretti *et al.*, 2021).

A análise das médias marginais estimadas (EMM) revelou contrastes marcantes entre as duas safras em quase todos os atributos avaliados, apesar da estabilidade na fotossíntese (Figura 20).

Figura 20 – Médias gerais dos parâmetros de trocas gasosas da soja comparadas entre os anos agrícolas de 2024 e 2025.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: As barras representam a média marginal estimada $\pm$ erro padrão. Letras iguais sobre as barras indicam ausência de diferença estatística entre as safras pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Ci: carbono interno ($\mu\text{mol mol}^{-1}$); Gs: condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); A: Taxa de fotossíntese líquida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); E: Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) WUE: Eficiência do uso da água ($\mu\text{molCO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$).

Embora a fotossíntese (A) tenha se mantido próxima a $35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em ambos

os anos, a concentração interna de CO₂ (C_i) em 2025 apresentou aumento significativo em relação a 2024, subindo de aproximadamente 170 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ para mais de 200 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Esse incremento indica maior disponibilidade ou menor consumo relativo de carbono no mesofilo durante o segundo ano (Figura 20). A alta concentração interna de CO₂ indica que a planta está em melhor condição para otimizar a fotossíntese, fundamental para a produção de biomassa e rendimento.

A *Azospirillum* realiza a produção de fitormônios como o ácido abscísico (ABA), que reduz o estresse hídrico da planta e melhora a retenção de água foliar, o que equilibra a condutância estomática para evitar perdas excessivas (Cohen *et al.*, 2014). Dessa forma, a coinoculação permite um balanço eficiente entre entrada de CO₂ para fotossíntese e perda de água por transpiração.

A condutância estomática e a transpiração seguiram tendência de elevação significativa em 2025 (Figura 20). A condutância estomática aumentou de 520 para 750 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto a transpiração subiu de 7,8 para quase 10 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, assim observa-se que houve maior abertura estomática, possivelmente, favorecida por melhores condições hídricas ou menor déficit de pressão de vapor (VPD) (Figuras 2 B-C e 20). O *Bradyrhizobium* e a *Azospirillum* promovem efeitos benéficos na planta influenciando diretamente nos aspectos fisiológicos como a condutância estomática e a transpiração (Cohen *et al.*, 2014).

Por fim, como o aumento na transpiração não foi acompanhado por um incremento proporcional na fotossíntese, a eficiência no uso da água sofreu redução significativa, reduzindo de 4,6 para 3,5 $\mu\text{molCO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$, evidenciando maior custo hídrico para a produção de biomassa em 2025 (Figura 20). Essa queda evidencia um maior "custo hídrico" para a produção na safra de 2025, onde a soja expôs limitações intrínsecas em converter o maior fluxo de gases em biomassa (Silva *et al.*, 2020).

Em SPD, onde há maior umidade do solo e a integridade do sistema radicular, a coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* melhora a eficiência no uso da água pelas plantas, porém no presente estudo, não houve esse resultado, em virtude do ano de 2025 ter altas temperaturas no período de avaliação das plantas (Figura 2C). As plantas coinoculadas apresentaram melhor desempenho fisiológico, conforme evidenciado pela maior transpiração, que está diretamente relacionada à capacidade da planta de manter abertura estomática adequada para as trocas gasosas e regulação térmica por meio da transpiração.

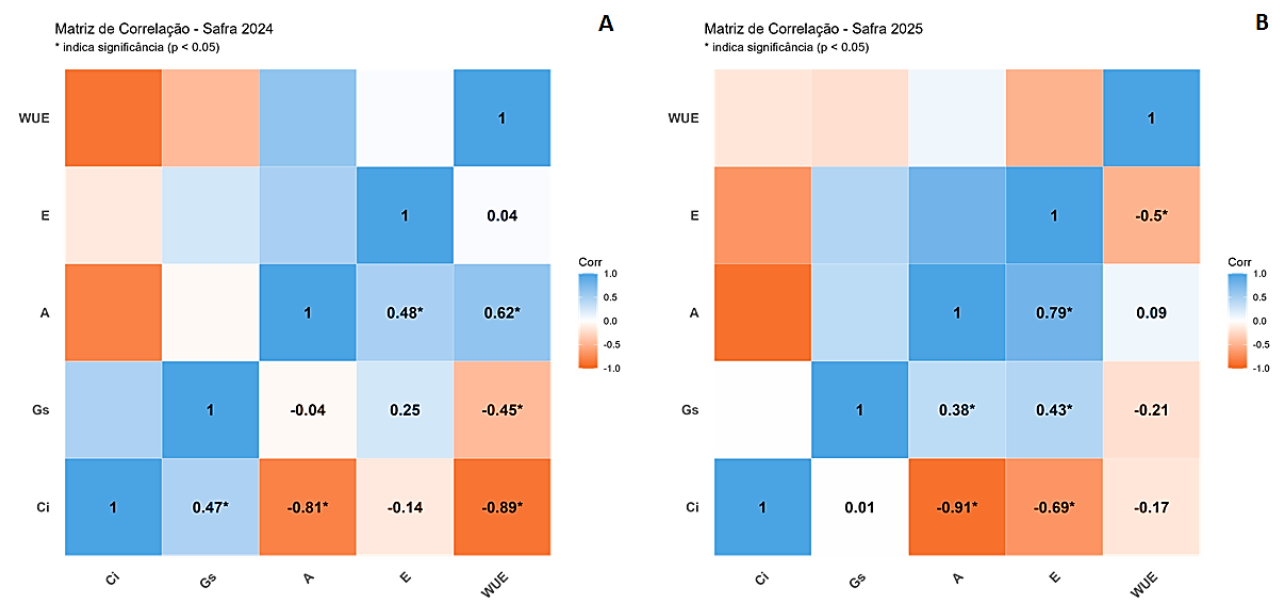
Enfim, a relação entre as interações microbianas e SPD favorecem os mecanismos fisiológicos da soja que resultaram nos melhores valores de condutância estomática, transpiração e concentração interna de CO₂ observados na safra de 2025, refletindo em maior eficiência no uso de recursos hídricos, nutricionais, e potencial de produtividade da cultura (Cohen *et al.*, 2014; Galindo *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2020).

7.3.5 Interdependência dos Parâmetros Fisiológicos (Trocas Gasosas)

As correlações entre as variáveis de trocas gasosas apresentaram variações significativas entre as safras, evidenciando respostas fisiológicas distintas em cada ano (Figuras 21 A e B).

Na safra 2024 (Figura 21 A), observou-se forte e significativa correlação negativa entre a concentração interna de CO₂ (Ci) e a fotossíntese (A) ($r = -0,81$; $p < 0,05$), indicando que menores concentrações de carbono interno associadas a maiores taxas de fotossíntese, possivelmente devido ao alto consumo metabólico. Quando a correlação entre Ci e A é inversamente proporcional, comprova-se que a fotossíntese está sendo limitada pela enzima Rubisco e não pela oferta estomática de CO₂ (Long e Bernacchi, 2003).

Figura 21 – Matriz de correlação de Pearson entre os parâmetros de trocas gasosas da soja nas safras de 2024 (A) e 2025 (B).



Fonte: produção da própria autora.
Legenda: Os valores numéricos indicam o coeficiente de correlação (r). O asterisco (*) denota correlação estatisticamente significativa ($p < 0,05$). A escala de cores representa a intensidade da associação, variando de -1 (vermelho) a 1 (azul). A: fotossíntese; Ci: concentração interna de CO_2 ; E: taxa de transpiração; Gs: condutância estomática; WUE: eficiência do uso da água.

A eficiência do uso da água (WUE) apresentou correlação positiva significativa com a fotossíntese (A) ($r = 0,62$) e correlação negativa acentuada com Ci ($r = -0,89$) e Gs ($-0,45$), sugerindo que o uso eficiente da água foi auxiliado pelo ganho fotossintético. Esse fato ocorreu em virtude das bactérias diazotróficas que aumentaram a disponibilidade de nitrogênio e a síntese de clorofila, contribuindo para a capacidade carboxilativa da soja (Savala *et al.*, 2021; Vorobey *et al.*, 2024). Em SPD, a alta fertilidade do solo e a presença de melhor estruturação da população microbiana, podem potencializar o metabolismo e resultar em maior absorção do carbono, mesmo com condições de restrição estomática moderada (Moretti *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

A condutância estomática (Gs) correlacionou-se positivamente com a Ci ($r = 0,47$), evidenciando a relação diretamente proporcional entre as variáveis, onde a maior Gs impactará no incremento da Ci por permitir maior fluxo de CO_2 para o mesófilo.

Houve correlação positiva e significativa entre fotossíntese e transpiração ($r = 0,48$ e $r = 0,79$), nas safras de 2024 e 2025, respectivamente. Essa relação indica que

houve controle mais instável nos estômatos, indicando uma resposta a condições de maior disponibilidade hídrica ou reduzida pressão de vapor (Buckley, 2019). Em anos de maior índice pluviométrico, as plantas priorizam o resfriamento da folha e a máxima assimilação, resultando em um acoplamento direto entre fixação do carbono e fluxo da água (Reina *et al.*, 2024).

Diferentemente da safra anterior, em 2025 (Figura 21 B) revelou relação mais estreita entre os atributos estomáticos e a fotossíntese. A taxa fotossintética (A) apresentou correlação positiva e significativa com a condutância estomática (Gs) ($r = 0,38$). Essa situação indica que a planta abriu os estômatos e a planta respondeu com alta taxa fotossintética, aumentando diretamente esse fluxo. Em anos mais úmidos ou menor VPD, o controle dos estômatos torna-se mais livre, permitindo que a transpiração dite o ritmo do intercâmbio gasoso (Buckley, 2019).

Houve correlação positiva e significativa entre a transpiração e a condutância estomática ($r = 0,43$). Assim, a abertura dos estômatos controla a entrada de CO₂, e consequentemente, ocorre a saída de vapores de água, ou seja, são atributos diretamente proporcionais onde a maior transpiração irá proporcionar maior troca gasosa (Syromyatnikov *et al.*, 2025)

A relação negativa entre Ci e A permaneceu crítica e intensificou-se ($r = -0,91$), reforçando que a eficiência carboxilativa possui como principal função a redução do carbono intercelular, e o consumo interno de CO₂ realizada pela Rubisco é a principal enzima para reduzir o carbono intercelular. Indica-se que a soja estava limitada de disponibilidade de CO₂ e pela alta demanda metabólica proporcionada pela simbiose das BPCP. A adoção de consórcios bacterianos podem modificar a fisiologia da soja, incrementando na eficiência fotoquímica e na nutrição (Moretti *et al.*, 2024; Jesus *et al.*, 2025). Além disso, houve outra relação negativa do Ci com a E ($r = -0,69$), e essa situação ocorre quando a assimilação foliar reduz a concentração interna de CO₂ mesmo com alta transpiração, onde a inoculação das bactérias pode incrementar na A, como visto anteriormente e regular o estresse da planta.

No entanto, a WUE perdeu significância estatística em relação à fotossíntese ($r = 0,09$), apresentando inclusive uma correlação negativa significativa com a transpiração ($r = -0,50$), o que indica que houve incremento nas perdas hídricas e não foi compensado proporcionalmente pelo ganho de carbono no ano de 2025. Sugere-se que o metabolismo das bactérias diazotróficas proveu os nutrientes, mas a regulação estomática sob abundância de água pode levar à excessiva transpiração,

que reduz a eficiência no uso da água (Reina *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

Nesse equilíbrio delicado, o papel da coinoculação torna-se estratégico. De acordo com Cassán e Diaz-Zorita (2016), a interação entre *Azospirillum brasilense* e *Bradyrhizobium* ajuda a mitigar esses fatores dissipativos. A produção de fitormônios como o ácido abscísico (ABA) e auxinas pelos microrganismos modula a sensibilidade estomática e a arquitetura radicular, otimizando a hidratação dos tecidos. Isso explica por que determinados tratamentos de inoculação conseguiram manter a performance fotossintética estável, reforçando a necessidade de manejos biológicos que otimizem não apenas a abertura estomática, mas a eficiência bioquímica e a resiliência da planta sob condições ambientais variáveis.

7.3.6 Componentes morfológicos e de produção e produtividade de grãos de soja, nas safras 2023, 2024 e 2025

Os resultados dos dados morfológicos e produtivos, indicaram que a resposta da soja às diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional foi influenciada pelas condições específicas de cada safra (Tabela 16). Verifica-se que para altura de plantas (ALT_{Total}) na soja de 2022/23, não houve efeito da interação entre inoculação e inoculação adicional. Entretanto, o tratamento controle (1.1) apresentou plantas maiores em relação ao 3.1 com a inoculação de *Bradyrhizobium* nas sementes e *Azospirillum* no sulco de semeadura. A inoculação adicional também não influenciou na altura da planta. Com adequada distribuição de chuvas (Figura 2 A) até o período de florescimento da planta (R1), a altura das plantas teve pouco efeito de estresse hídrico, tanto as plantas dos tratamentos com inoculação na semeadura e adicional.

Para altura de inserção da primeira vagem (ALT_{1VG}) não houve diferenças entre inoculação e inoculação adicional (Tabela 16). Em concordância, alguns estudos citam a ausência de efeitos das BPCPs na altura da primeira vagem da soja (Molla *et al.*, 2001; Barros *et al.*, 2020; Michelon *et al.*, 2020), com variações apenas por fatores genéticos de cada cultivar, além da população de plantas e quantidade de palhada na superfície do solo.

Na população de plantas (POP), a inoculação de ambas bactérias nas sementes proporcionou menor população final de plantas de soja. O efeito da redução também ocorreu na inoculação adicional (Tabela 16). A alta temperatura e o período da má distribuição hídrica coincidiram com a semeadura (Figura 2 A) e a relação com as BPCP, não promoveu a tolerância ao estresse hídrico pela produção dos fitormônios,

evidenciando que, a alta temperatura agravou o efeito de competição na rizosfera pelas bactérias no tratamento 4, com resposta inferior às demais formas de inoculação, podendo interferir na germinação e desenvolvimento das plântulas. Ressalta-se que esse resultado de redução na POP, refletiu negativamente na produtividade de grãos (Tabela 17).

Tabela 16 – Médias dos parâmetros de desenvolvimento vegetativo e componentes de produção da cultura da soja em resposta a diferentes estratégias de inoculação e inoculação adicional nas safras agrícolas 2023, 2024 e 2025.

(Continua)							
safras de 2023-2025							
Ano Safra	Inoculação	Fator de Inoculação Adicional	Parâmetros de desenvolvimento				
			ALT1VG	ALTtotal	POP	NVP	NGP
2023	1	1	0,269 ^a	1,37 ^a	233456 ^a	62,7 ^a	118,0 ^d
		2	0,251 ^a	1,32 ^{ab}	212654 ^{ab}	61,0 ^a	142,5 ^{bcd}
	2	1	0,280 ^a	1,29 ^{ab}	235926 ^a	57,5 ^a	131,0 ^{bcd}
		2	0,274 ^a	1,32 ^{ab}	215432 ^{ab}	53,2 ^a	122,0 ^{cd}
	3	1	0,289 ^a	1,23 ^b	243672 ^a	56,5 ^a	129,7 ^{bcd}
		2	0,261 ^a	1,29 ^{ab}	238888 ^a	67,0 ^a	151,5 ^b
	4	1	0,249 ^a	1,30 ^{ab}	203518 ^{ab}	66,0 ^a	145,0 ^{bc}
		2	0,273 ^a	1,30 ^{ab}	190123 ^b	61,5 ^a	178,0 ^a
2024	1	1	0,317 ^a	0,97 ^a	199382 ^a	40,0 ^a	80,2 ^a
		2	0,307 ^a	0,97 ^a	183950 ^a	49,2 ^a	78,0 ^a
	2	1	0,320 ^a	0,97 ^a	200709 ^a	33,7 ^a	61,5 ^a
		2	0,325 ^a	0,97 ^a	200493 ^a	38,2 ^a	68,5 ^a
	3	1	0,317 ^a	0,97 ^a	193271 ^a	39,2 ^a	71,5 ^a
		2	0,320 ^a	0,95 ^a	198210 ^a	37,7 ^a	73,7 ^a
	4	1	0,290 ^a	0,95 ^a	190185 ^a	43,7 ^a	82,0 ^a
		2	0,317 ^a	0,95 ^a	202592 ^a	36,2 ^a	73,5 ^a
2025	1	1	0,295 ^a	1,25 ^a	291358 ^a	46,2 ^a	110,0 ^a
		2	0,270 ^a	1,20 ^a	330864 ^a	67,5 ^a	162,5 ^a
	2	1	0,265 ^a	1,32 ^a	308024 ^a	45,0 ^a	107,2 ^a
		2	0,260 ^a	1,30 ^a	316666 ^a	42,0 ^a	99,7 ^a
	3	1	0,275 ^a	1,30 ^a	291358 ^a	38,7 ^a	94,2 ^a
		2	0,285 ^a	1,32 ^a	301234 ^a	45,7 ^a	109,2 ^a

safras de 2023-2025							
Ano Safr	Inoculação	Fator de Inoculação Adicional	Parâmetros de desenvolvimento				
			ALT1VG	ALTtotal	POP	NVP	NGP
	4	1	0,272 ^a	1,27 ^a	287036 ^a	46,2 ^a	112,2 ^a
		2	0,255 ^a	1,22 ^a	320987 ^a	49,0 ^a	119,7 ^a

(Conclusão)

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: ALT1VG: Altura da primeira vagem (m); ALTtotal: Altura total da planta (m); POP: População de plantas (plantas ha⁻¹); NVP: Número de vagens por planta; NGP: Número de grãos por planta. Médias seguidas por letras distintas na coluna, dentro de cada safra, diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

A soja de crescimento indeterminado, normalmente compensa falhas na população de plantas por meio da plasticidade fenotípica, aumentando a distribuição de ramos e vagens, e consequentemente na produção de grãos (Deretti *et al.*, 2022). Por outro lado, todos os métodos avaliados de inoculação e inoculação adicional não foram eficazes em demonstrar efeitos, em virtude da escassez hídrica (Figura 2A) no período que foi efetuado a inoculação adicional (estágio R1), que pode ter contribuído para menor mobilização da calda de pulverização no solo e tornar eficaz a infecção das raízes.

Contudo, houve efeito da interação de inoculação e inoculação adicional para o NGP (Tabela 16), demonstrando que somente o tratamento 4.1 (inoculação de ambas as bactérias nas sementes) promoveu maior número de grãos por planta, por efeito de compensar a menor POP de plantas (Tabela 16). Em relação à inoculação adicional, ela incrementou o número de grãos por planta, exceto no tratamento 2.2 (apenas *Bradyrhizobium* nas sementes). Além disso, a interação entre sem inoculação adicional e com inoculação adicional, houve destaque para com a inoculação adicional, por obter as maiores médias de NGP.

Consideramos que, a produtividade seja estimada de acordo com a relação do número de flores, vagens e sementes, acredita-se que os hormônios vegetais liberados pela planta por efeito da atuação da *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* nas sementes, influenciaram no atributo em questão, principalmente no período de inoculação adicional de *Bradyrhizobium* na soja, onde a auxina liberada na planta, promove a formação e desenvolvimento das sementes (Gutierrez *et al.*, 2007), a

interação entre os microrganismos foi benéfico mesmo em período de estresse hídrico.

O NVP não apresentou diferenças para efeito da interação entre inoculação e inoculação adicional, e também não houve efeito dos tratamentos da inoculação e da inoculação adicional (Tabela 16). O N está correlacionado com a FBN, então, uma FBN eficiente proporcionará mais nódulos e disponibilizará mais N_2 para o desenvolvimento da planta (Epstein e Bloom, 2006), ademais, há estímulos na produção de hormônios da planta, tal como, citocinina, giberelina e auxina que influenciam na massa da planta (Spaepen *et al.*, 2007; Coatti *et al.*, 2010). A citocinina promove a divisão e diferenciação celular que reflete no crescimento da planta e estimula a formação dos brotos laterais (Davies, 2010). Assim, a relação entre maior quantidade de ramos promoverá maior quantidade de flores, que podem originar mais vagens e/ou sementes (Liu *et al.*, 2004), entretanto, neste caso, sem efeito dos tratamentos aqui avaliados para NVP.

Nas safras de 2024 e 2025 (Tabela 16), não houve efeitos dos tratamentos isolados ou da interação para os atributos de ALT, ALT1VG, POP, NGP, NVP, o que sugere efeito apenas de fatores genéticos e ambientais que possam ter afetado os atributos, além disso, as sucessivas inoculações e inoculações adicionais realizadas anualmente na mesma área (parcelas) associado aos impactos benéficos proporcionados pelo SPD podem ter causado equilíbrio nas populações microbianas.

Na Tabela 17, constam os valores dos componentes de produção e produtividade de grãos pelas respectivas formas de manejo de inoculação da soja.

Houve efeito da interação entre inoculação e inoculação adicional para número de nódulos (NOD) e massa fresca de nódulos (MFNOD), onde, independentemente da presença de *Bradyrhizobium* ou presença e ausência do *Azospirillum* nas sementes, sem inoculação adicional, ou ausência total dos microrganismos no solo, resultaram em maior número de nódulos. Quanto à MFNOD, sem inoculação adicional, o tratamento 2.2 também apresentou a maior massa de nódulos, assim a ausência da inoculação de ambas as bactérias nas sementes, parece reduzir o efeito competição na rizosfera, a qual mesmo com a aplicação de *Bradyrhizobium* em R1 não surtiu efeito na formação de novos nódulos.

Neste processo de nodulação, há expansão da raiz, e consequentemente favorece a absorção de água e nutrientes (Rondina *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2021), assim, a coinoculação pode (*Azospirillum* e *Bradyrhizobium*) estimular a produção de

flavonoides pela planta, resultando na expressão do gene Nod no *Bradyrhizobium*. As raízes detectam a compatibilidade do Nod e produzem diversos sinais bioquímicos, envolvendo fluxos de íons, equilíbrio hormonal e absorção de cálcio, que geram a multiplicação de células corticais e formação de pêlos radiculares, para iniciar a formação de linhas de infecção pelos microrganismos, porém com a inoculação adicional realizada em período de estresse hídrico severo (Figura 2A), os microrganismos podem ter reduzido a capacidade de secreção dos flavonoides, pela não infecção das raízes.

Em contrapartida, há relatos na literatura sobre a soja com inoculação adicional com *Bradyrhizobium* apresentarem nodulação mais abundante e precoce (Chibeba *et al.*, 2015; Hungria *et al.*, 2015). As BPCPs isoladas de plantas, são originalmente provenientes da raiz ou da rizosfera e, portanto, pertencentes a uma população microbiana. As populações microbianas são constituídas por alto número de indivíduos e com o objetivo de sobreviver, realizam relações com os demais membros dessas populações. Essas relações são estabelecidas de forma que as funções de cada membro sejam complementares para eventos como proteção e nutrição (He *et al.*, 2014; Hallam e Mccutcheon, 2015; Santhanam *et al.*, 2015). Entretanto, em algumas situações, as interações estabelecidas tornam-se um impedimento para o estabelecimento de um microrganismo exógeno por efeito antagônico e/ou de competição de estirpes exógenas colocadas na rizosfera (He *et al.*, 2014).

Tabela 17 – Médias dos parâmetros de nodulação, massa de grãos e produtividade da cultura da soja submetida a regimes de inoculação e inoculação adicional nas safras 2023/2024/2025.

(Continua)							
safras de 2023-2025							
Ano Safr	Inoculação	Fator de Inoculação Adicional	Parâmetros de desenvolvimento				
			NOD	MFNOD	MSNOD	M100	PG
2023	1	1	37,0 ^a	0,85 ^{ab}	0,51 ^a	17,9 ^a	4876 ^{ab}
		2	33,0 ^a	0,69 ^{abc}	0,50 ^a	18,5 ^a	4951 ^{ab}
	2	1	26,5 ^{ab}	0,56 ^{abc}	0,29 ^a	17,1 ^a	4951 ^{ab}
		2	33,7 ^a	0,89 ^a	0,42 ^a	17,2 ^a	5318 ^a
	3	1	25,2 ^{ab}	0,80 ^{abc}	0,43 ^a	17,3 ^a	5599 ^a
		2	32,7 ^a	0,76 ^{abc}	0,34 ^a	17,2 ^a	5862 ^a
	4	1	26,2 ^{ab}	0,45 ^c	0,45 ^a	18,6 ^a	4937 ^{ab}

safras de 2023-2025							
Ano Safr	Inoculação	Fator de Inoculação Adicional	Parâmetros de desenvolvimento				
			NOD	MFNOD	MSNOD	M100	PG
2024	1	2	15,7 ^b	0,50 ^{bc}	0,34 ^a	18,2 ^a	3814 ^b
		1	51,5 ^a	1,75 ^a	0,55 ^a	12,5 ^a	2110 ^a
	2	2	53,5 ^a	1,30 ^a	0,45 ^a	11,5 ^a	1758 ^a
		1	49,0 ^a	1,67 ^a	0,57 ^a	13,1 ^a	1876 ^a
	3	2	61,5 ^a	1,57 ^a	0,65 ^a	13,4 ^a	1900 ^a
		1	49,0 ^a	1,27 ^a	0,50 ^a	12,6 ^a	1773 ^a
	4	2	69,7 ^a	2,05 ^a	0,72 ^a	13,5 ^a	1891 ^a
		1	49,5 ^a	1,37 ^a	0,52 ^a	13,1 ^a	2032 ^a
		2	52,5 ^a	1,90 ^a	0,47 ^a	13,5 ^a	1914 ^a
		1	44,2 ^a	1,92 ^a	1,35 ^a	16,5 ^a	4774 ^a
2025	1	2	53,0 ^a	2,30 ^a	1,50 ^a	15,9 ^a	5101 ^a
		1	61,7 ^a	2,27 ^a	1,55 ^a	14,7 ^a	4808 ^a
	2	2	47,2 ^a	1,97 ^a	1,52 ^a	15,2 ^a	4535 ^a
		1	34,7 ^a	1,37 ^a	1,12 ^a	14,8 ^a	4640 ^a
	3	2	39,0 ^a	1,57 ^a	1,25 ^a	16,8 ^a	5274 ^a
		1	41,7 ^a	2,05 ^a	1,37 ^a	16,9 ^a	4667 ^a
	4	2	34,0 ^a	1,35 ^a	1,12 ^a	16,3 ^a	5179 ^a
		1					

(Conclusão)

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: NOD: Número de nódulos; MFNOD: Massa fresca de nódulos (g); MSNOD: Massa seca de nódulos (g); M100: Massa de 100 grãos (g); PG: Produtividade de grãos (kg ha⁻¹). Médias seguidas por letras distintas na coluna, dentro de cada safra, diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). Inoculação: 1-Controle (soja sem inoculação), 2-Soja com *Bradyrhizobium elkanii* nas sementes, 3-Soja inoculada com *B. elkanii* nas sementes + *Azospirillum brasilense* no sulco de semeadura e 4-Soja inoculada com *B. elkanii* e *A. brasilense* nas sementes. Fator de inoculação adicional: sem inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (1) e com inoculação adicional no solo nas entrelinhas da soja (2) em estágio R1.

Na inoculação, os maiores valores para o tratamento controle, refere-se ao fato do SPD ser um sistema consolidado e desta forma, ter uma alta população de microrganismos nativos que atuaram em benefício para a nodulação (NOD), e consequentemente favoreceu na MFNOD. O SPD incrementa a diversidade e abundância dos microrganismos no solo, principalmente na superfície do solo. Esse fato refere-se à manutenção dos restos culturais na superfície e ao menor

revolvimento do solo, o que cria um sistema estável para a microbiota (Mondaca *et al.*, 2024).

Além disso a atuação da população nativa de microrganismos podem auxiliar a nodulação das plantas, pois há histórico de cultivos de soja em área de longo período de SPD. Pode-se notar na Figura 2A, que o período em que foi realizada a inoculação adicional, ocorreu em período de estresse hídrico severo, desfavorecendo a atuação dos microrganismos na produtividade de grãos, pois sem alta disponibilidade de água no solo, não há mobilidade dos microrganismos para infectar as raízes. Tanto o excesso quanto a escassez hídrica podem afetar negativamente a soja. Secas severas interrompem a disponibilidade de água e reduzem a produtividade de grãos, principalmente nos estágios críticos como floração e enchimento de grãos (Chen *et al.*, 2016). A interação entre sem inoculação adicional e com inoculação adicional, presume-se que locais inoculados favorecem a produtividade dos grãos, mais do que áreas em que houve reaplicação de qualquer tipo dos microrganismos, mas é necessário grande volume de água para carrear os microrganismos aplicados em superfície do solo.

Em relação a *Bradyrhizobium* nas sementes e a *Azospirillum* no sulco, o fato da *Bradyrhizobium* estar em contato com a semente ocorre a interação imediata e liberação de substâncias no decorrer do desenvolvimento embrionário da plântula. Já a *Azospirillum* por ter sido aplicada na superfície do solo, só ocorre o contato quando a plântula emerge do solo, ou seja, a *Bradyrhizobium* teve a primeira interação com a semente e liberou substâncias, e, posteriormente, a *Azospirillum* teve o segundo contato e também liberou substâncias benéficas para o crescimento e desenvolvimento da planta.

Não houve efeito dos tratamentos para massa seca de nódulos (MSNOD) (Tabela 17). Estudos em consonância afirmam ter resultados semelhantes, onde a interação entre *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* em conjunto nas sementes, e o *Bradyrhizobium* inoculado via solo, não promoveram efeitos benéficos na massa seca dos nódulos (Molla *et al.*, 2001; Queiroz Rego *et al.*, 2018; Alberto-Casas *et al.*, 2019). Além disso, a *Azospirillum* resulta em uma alta taxa de nodulação precoce na porção superior do sistema radicular (Chibeba *et al.* 2015) e na associação com *Bradyrhizobium* esse efeito é intensificado (Cardoso *et al.*, 2009).

Para a M100 (Tabela 17), não houve efeito da interação entre inoculação e inoculação adicional. No entanto, a inoculação inicial (semeadura) promoveu grãos

mais pesados no tratamento 4, pelo provável efeito compensatório de menor POP (Tabela 16). Os resultados revelam que, o T4 proveniente do *Bradyrhizobium* que realiza a FBN por meio da relação simbiótica com a planta, e a *Azospirillum* que produz os fitohormônios e atuam na estimulação do crescimento e desenvolvimento das plantas (Puentes *et al.*, 2017), a combinação desses dois microrganismos foi capaz de melhorar o desempenho das plantas e conseqüentemente incrementar a massa dos grãos. A ausência de resposta da massa de 100 grãos na interação entre inoculação e inoculação adicional, pode ser proveniente do estresse hídrico (Figura 2A) no período da inoculação adicional (R1), que não promoveu efeito na planta. Alguns estudos observaram o mesmo efeito na inoculação adicional, onde as condições ambientais podem ter provocado a diferença entre os resultados (Naoe *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2022).

Na PG houveram diferenças significativas da *Bradyrhizobium* inoculada nas sementes em conjunto com a inoculação adicional da *Bradyrhizobium* em R1 da soja, além da *Bradyrhizobium* inoculada junto com a *Azospirillum* via sulco de semeadura, cujo resultado (Tabela 17) demonstrou maiores produtividades. Porém, a menor produtividade de grãos foi no tratamento 4 (ambas as bactérias via sementes) em combinação com a inoculação adicional de *Bradyrhizobium*. Assim, neste tratamento, mesmo o maior NGP e M100 (Tabelas 16 e 17) não foi suficiente para compensar a menor POP (Tabela 16).

A inoculação é essencial em áreas onde a soja é cultivada no primeiro ano ou foi cultivada há muito tempo, pois as BPCPs estão em baixa população ou ausentes no solo. Mesmo em áreas em que a soja é comumente semeada na mesma área, é interessante realizar a inoculação a cada safra, por via sementes ou sulco de semeadura. Há ganhos médios de 8% em produtividade, por consequência da inoculação anual da soja com *Bradyrhizobium*, em áreas de cultivo de soja (Hungria *et al.*, 2013; Hungria e Nogueira, 2015), favorecendo dessa forma, a sustentabilidade e retorno econômico em virtude do baixo custo do inoculante.

Nas safras 2024 e 2025 (Tabela 17), não houve efeitos dos tratamentos isolados ou da interação para NOD, MFNOD, MSNOD, M100 e PG. Em áreas onde tem histórico de cultivo de soja não há indícios de efeitos da aplicação dos inoculantes no sulco de semeadura da planta, em comparativo à inoculação via sementes, devido às bactérias já estarem presentes na área (Campo *et al.*, 2009).

Além disso, as inoculações e inoculações adicionais realizadas nas safras,

podem ter incrementado o teor de N no solo influenciando no crescimento e desenvolvimento da planta, ou seja, forneceram nitrogênio suficiente para as plantas. O processo de mineralização do N no solo ocorre do estado orgânico para inorgânico, e ocorre pela decomposição do material orgânico (capins dos 2 anos de cultivo e histórico de 14 anos em SPD) realizada pelos microrganismos, que utilizam a energia liberada da decomposição para sobreviverem e como resultado, aumentam o N na forma inorgânica que é facilmente absorvido pelas plantas (Hutchison e Walworth, 2007). Ademais, o *Bradyrhizobium* fornece o suprimento de N-N₂ do ar atmosférico necessário para a planta, mesmo em alto nível de produtividade (Hungria e Nogueira, 2019), sendo a exigência nutricional desse elemento para a soja, cerca de 80 kg para cada tonelada de grão produzido (Hungria e Nogueira, 2020).

Outra questão relevante é o fato da área estar sob SPD há 14 anos, ou seja, a palhada remanescente na superfície do solo, foi ciclada pelos microrganismos e favoreceu o incremento de MO e disponibilizou nutrientes para a planta. O SPD favoreceu o crescimento da atividade biológica do solo, ou seja, a diversidade, atividade da comunidade e biomassa microbiana (Szostek *et al.*, 2022; Engell *et al.*, 2022; Kurm *et al.*, 2023).

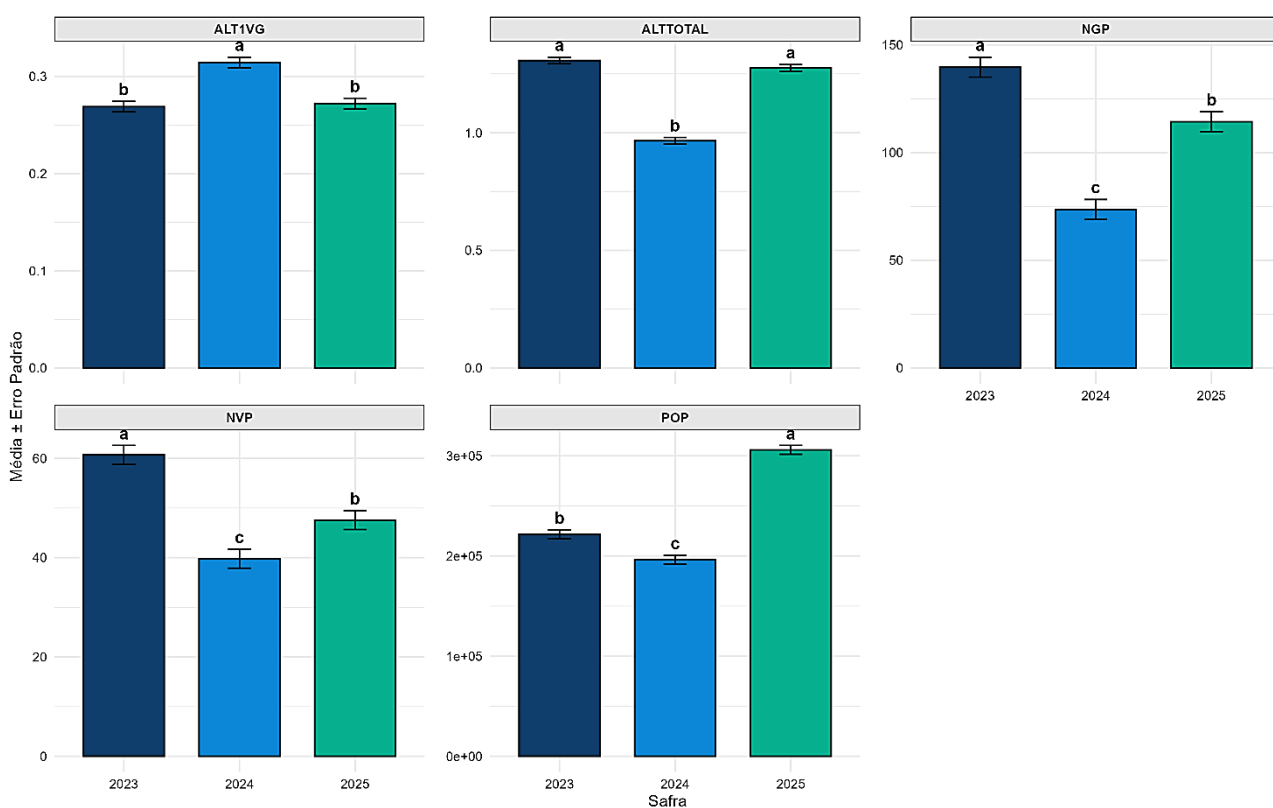
Outro fator que pode ter limitado o efeito dos tratamentos, foi a condição climática (Figuras 2 B e C), com distribuição normal da precipitação pluvial durante os estádios R1 e R3 da soja, mas com deficiência hídrica e ondas de calor a partir destes (fase de enchimento de grãos). Ressalta-se a importância da precipitação nesse período crítico, onde foi realizada a inoculação e inoculação adicional (R1), pois a água percolada pode ter sido um agente facilitador, para conduzir os microrganismos para as raízes mais profundas do perfil do solo, auxiliando na eficiência da absorção de água e nutrientes.

Em R3, com as raízes infectadas pelos microrganismos aliados à incidência de chuvas, colaborou para o desenvolvimento das vagens, mas a limitação hídrica e temperaturas elevadas a partir desta fase limitaram o enchimento de grãos e podem inclusive ter contribuído para o abortamento de vagens, o que determinou a baixa PG (Tabela 17).

No que tange ao desenvolvimento vegetativo, observa-se variações significativas entre as safras avaliadas (Figura 22). A altura de inserção da primeira vagem foi superior na safra de 2024, atingindo valores significativamente maiores do que em 2023 e 2025, que não diferiram entre si. Entretanto, esse resultado de 2024

não refletiu na altura total das plantas, variável na qual 2024 apresentou o menor desempenho. Nas safras de 2023 e 2025 as plantas foram mais altas. Esses resultados sugerem que houve um alongamento precoce dos entrenós e a inserção das vagens, tal como, o impacto da densidade populacional, promovendo o estresse devido a sombreamento, ou por efeitos da interação ambiente e genética, além do grupo de maturação que pode contribuir para a dissociação dessas características (Yildirim *et al.*, 2023; Goufo *et al.*, 2024; Matsui *et al.*, 2024; Raievska *et al.*, 2024).

Figura 22 – Atributos de crescimento, componentes da produção e produtividade da soja em função das safras agrícolas 2023, 2024 e 2025.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: ALT: altura total de plantas; ALT1VG: altura de inserção da primeira vagem; NVP: número de vagens por planta; NGP: número de grãos por planta; POP: população de plantas. Médias seguidas por letras distintas indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Porém, há um ponto positivo em plantas mais altas na altura da inserção da primeira vagem no ano de 2024, pois é uma característica fundamental para a colheita mecanizada, por reduzir as perdas (Ramteke *et al.*, 2012). Ademais, as diferentes épocas de manejo podem influenciar no período de redução da população das plantas e de cultivo, impactando no tamanho dos entrenós e na altura das vagens (Sugimoto *et al.*, 2024).

Os resultados citados anteriormente podem ter sido influenciados pela presença das bactérias diazotróficas no solo, onde houve desencadeamento de processos fisiológicos para produção de hormônios. A giberilina, que atua no prolongamento do entrenó basal e na altura de inserção da primeira vagem por meio da regulação positiva de genes de biossíntese (GA20ox2, GA20ox3, GA3ox2, GA3ox3), a citocinina, que regula o alongamento do internódulo basal e a auxina, que interfere menos diretamente no alongamento dos entrenós basais, porém, interage com a citocinina e a giberilina no crescimento geral das plantas (Perilli *et al.*, 2010; Thapar *et al.*, 2025).

Quanto aos componentes de produção por indivíduo, o número de vagens por planta e o número de grãos por planta apresentaram comportamento decrescente de 2023 para 2025, com a safra de 2024 registrando os menores resultados. A inoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* aliado às condições ambientais de cada ano, podem ter influenciado nos resultados citados anteriormente. A coinoculação de microrganismos elevou o número de grãos e vagens por planta, refletindo em alto potencial produtivo da planta (Ribeiro *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2023).

A eficácia da coinoculação depende das condições do ambiente, tal como, quantidade de precipitação ou estresse hídrico, tipo de solo, práticas de plantio, por exemplo, SPD em solos arenosos, que refletem melhor à coinoculação ou podem afetar negativamente a nodulação e a produtividade, entretanto, a coinoculação pode reduzir alguns desses estresses (Rondina *et al.*, 2020; Barbosa *et al.*, 2021; Burg *et al.*, 2025).

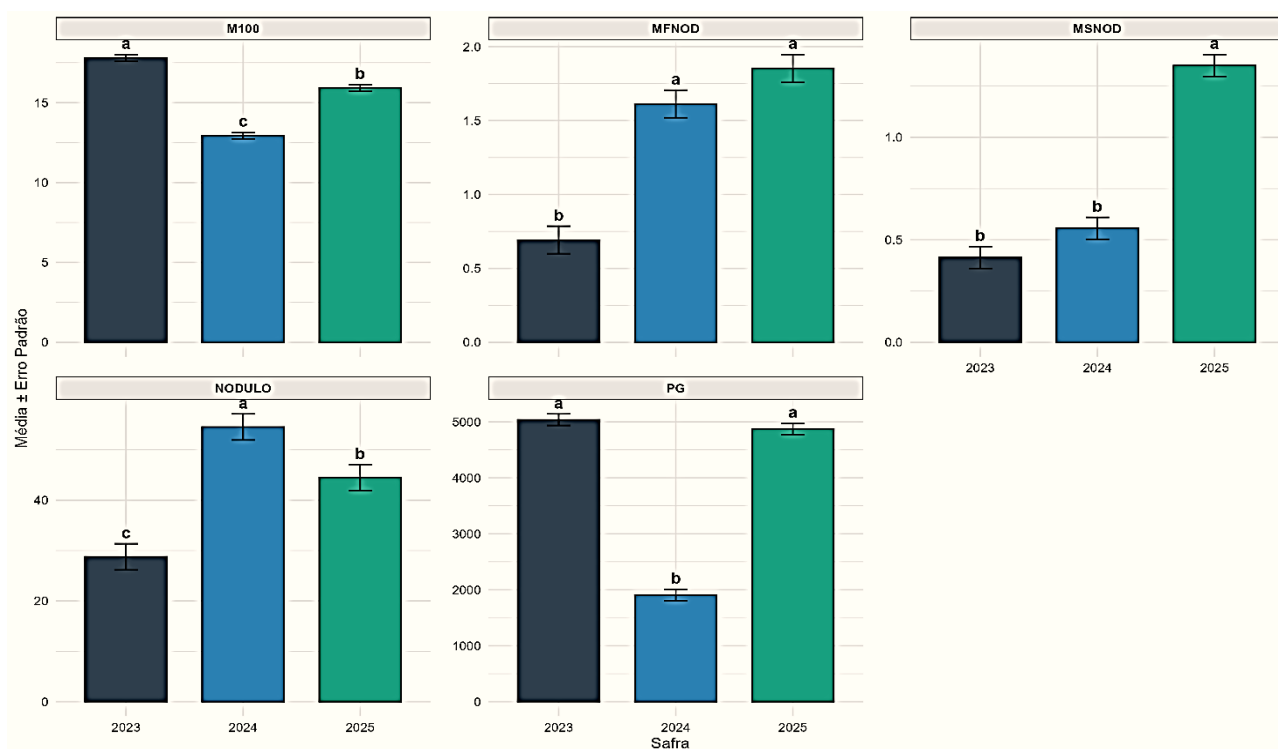
A coinoculação de microrganismos aumentou o número de vagens por planta, grãos por vagem e a massa de 100 grãos, incrementando da produtividade. Por exemplo, o uso de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* com cobalto (Co) e molibdênio (Mo) aumentou a produtividade de grãos em 10%, em média, atingindo 4.904 kg ha⁻¹ (Barbosa *et al.*, 2023). Já a população de plantas foi significativamente maior em 2025, indicando uma compensação de estande em relação às safras anteriores, este fato está relacionado com a distribuição uniforme das plantas e a densidade ideal de semeadura, fatores essenciais para aumentar a produtividade (Burg *et al.*, 2025).

Em relação aos nódulos e a produção vegetal, os resultados indicam um incremento progressivo na qualidade dos nódulos ao longo do tempo (Figura 23). Embora a safra de 2024 tenha apresentado o maior número de nódulos, superando as safras de 2023 e 2025, a biomassa desses nódulos seguiu uma tendência diferente.

A MFNOD e a MSNOD foram significativamente superiores na safra de 2025, em comparação às demais. A formação dos nódulos é influenciada pela interação das bactérias e a planta, além da diversidade genética das cepas do *Bradyrhizobium*. Essas diferentes cepas podem variar na eficiência da colonização e nodulação, e promover maior número de nódulos, mas nem sempre com maior eficiência na simbiose (Mhadhbi *et al.*, 2005; Menna *et al.*, 2011; Patra *et al.*, 2024).

Sugere que, apesar da menor nodulação em 2025 em relação a 2024, os nódulos formados no último ano foram maiores e mais desenvolvidos, possivelmente apresentando maior eficiência simbiótica. Essa eficiência simbiótica está relacionada com a capacidade de fixar nitrogênio e o desenvolvimento da raiz. A interação entre o *Azospirillum* e o *Bradyrhizobium* pode incrementar na biomassa total e torna-los mais eficientes (Juge *et al.*, 2012; Jesus *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2023).

Figura 23 – Parâmetros de nodulação e produtividade de grãos da soja nas safras agrícolas 2023, 2024 e 2025.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: M100: massa de 100 grãos; MFNOD: massa fresca de nódulos; MSNOD: massa seca de nódulos; NODULO: número de nódulos por planta; PG: produtividade de grãos. Médias seguidas por letras distintas indicam diferença estatística pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A produtividade de grãos (PG) e a massa de 100 grãos (M100) evidenciaram o

impacto das variações sazonais na produtividade da cultura. A safra de 2023 registrou a maior massa de 100 grãos, seguida por 2025, enquanto 2024 apresentou os grãos mais leves entre as três safras avaliadas. Esse sucesso na safra de 2023, se deve ao fato do bom desenvolvimento radicular que é essencial para absorver nutrientes e consequentemente dar suporte aos nódulos, sendo que a interação simbiótica entre as bactérias favorece a planta (Juge *et al.*, 2012; Vicente *et al.*, 2022; Chaouki *et al.*, 2026).

O incremento da M100 no ano de 2023, também pode ser atribuído, aos efeitos hormonais induzidos pelos microrganismos inoculados em conjunto nas sementes, tendo em vista os diversos grupos de hormônios vegetais que estão relacionados à parte fisiológica do grão (Hungria *et al.*, 2015). A auxina (AIA) participa do processo de formação e desenvolvimento dos grãos, e a sua presença está ligada à síntese de ácido abscísico (Gutierrez *et al.*, 2007). O gênero *Bradyrhizobium* pode produzir alguns fitohormônios, tal como o AIA, giberelina (Cássan *et al.*, 2009) e citocininas (Spaepen *et al.*, 2007). A *Azospirillum* pode produzir as giberelinas, citocininas, etileno (Perrig *et al.*, 2007; Gómez *et al.*, 2014), ácido abscísico (Cohen *et al.*, 2008) e também as auxinas (Spaepen *et al.*, 2007; Masciarelli *et al.*, 2013) que podem incrementar a translocação de fotoassimilados e aumentar a massa dos grãos.

Na produtividade, as safras de 2023 e 2025 foram estatisticamente equivalentes, atingindo as maiores produtividades. A associação do *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* para a produção de grãos está relacionada à produção de fitohormônios, como auxinas e giberelinas, que promovem o crescimento das plantas e a eficiência na absorção de nutrientes e água (Juge *et al.*, 2012; Provorov *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023), podendo melhorar a tolerância a estresses abióticos, como salinidade e seca, aumentando a produtividade agrícola (Provorov *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2026).

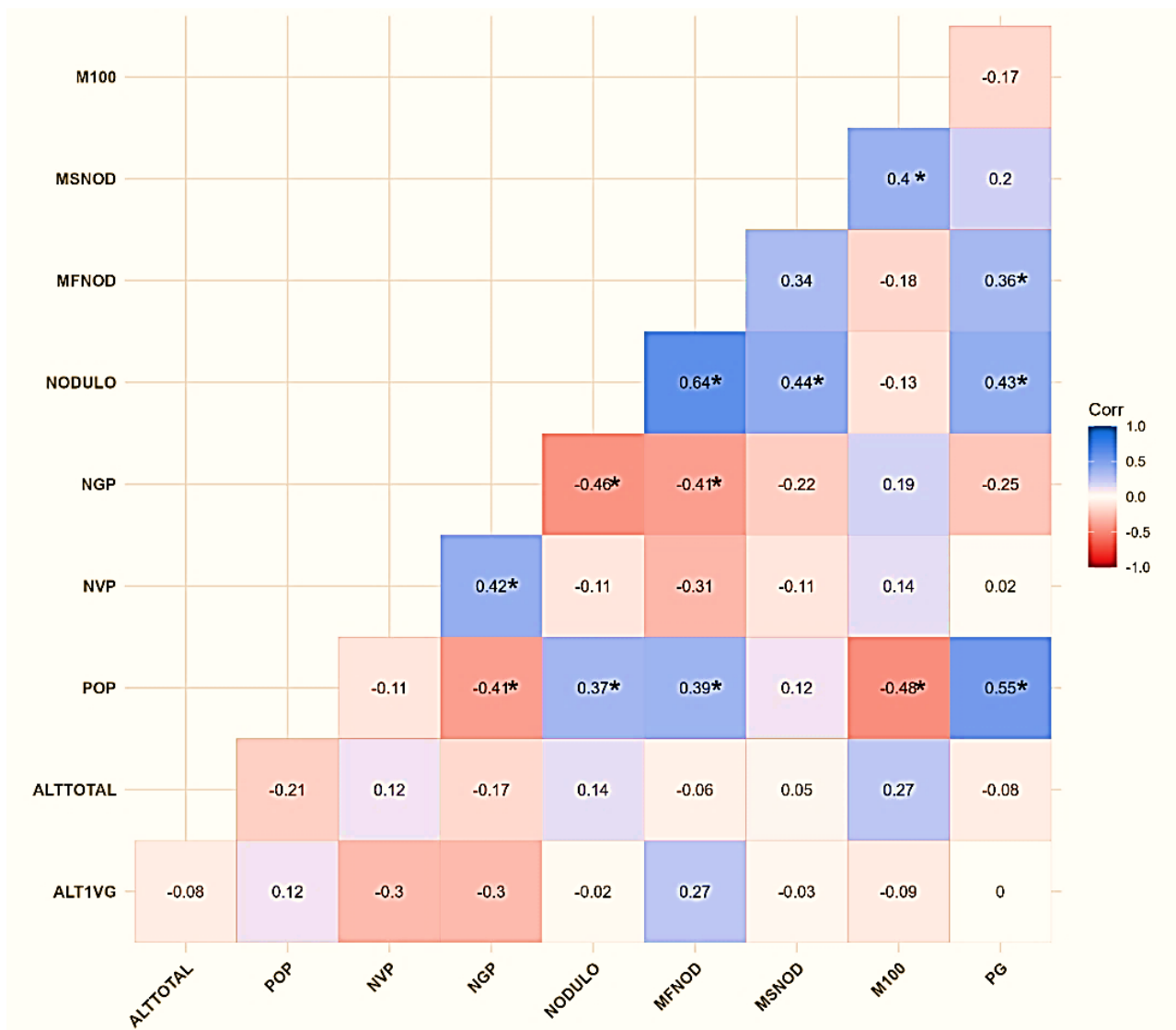
A safra de 2024 apresentou alta perda da produtividade, sendo significativamente inferior às demais. Ressalta-se que o sucesso na produção de 2025, mesmo com menor número de grãos por planta, deve-se à combinação de uma maior população de plantas e ao adequado desenvolvimento da massa seca dos nódulos, que sustentaram a produção final em níveis elevados (Figura 23).

7.3.7. Análises de correlação do desenvolvimento vegetativo e produtividade nas safras de 2023-2025

As correlações entre as variáveis morfológicas e produtividade de grãos apresentaram comportamentos distintos ao longo das três safras avaliadas (Figuras 24, 25 e 26). Na safra 2023 (Figura 24), observou-se que a MSNOD apresentou correlação positiva e significativa com o M100 ($r = 0,40$), MFNOD e PG ($r = 0,36$), NOD e PG ($r = 0,43$).

O heatmap da safra de 2023, demonstrou a relação entre NOD e MFNOD, NOD e MSNOD por apresentar correlação positiva forte. Esses atributos estão diretamente relacionados e são comprovados por diversos trabalhos que avaliam padrões de nodulação na cultura da soja (Espinosa-Victoria *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2015; Innosensia *et al.*, 2023). Ademais, ressalta-se que houve efeito da inoculação e inoculação adicional do *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* que promoveram efeitos benéficos na nodulação das plantas. Os nódulos são órgãos especializados que se formam nas raízes, devido à interação das bactérias que realizam a FBN na soja (Mahapatra *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2023; Meilhoc *et al.*, 2025), e a interação entre soja-microrganismo, inicia por meio do reconhecimento de bactérias compatíveis pela planta por meio de envio de um sinal fisiológico (Oldroyd, 2013). Estimativas apontam que essa interação fornece de 40 a 70% a mais de Nitrogênio para produção da soja, dependendo das condições de crescimento da planta, do simbionte bacteriano e da interação com o hospedeiro (Pauferro *et al.*, 2010; Collino *et al.*, 2015; Santachiara *et al.*, 2017).

Figura 24 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis biométricas, componentes de rendimento e nodulação da cultura da soja na safra 2023.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Quadrantes preenchidos com asteriscos (*) indicam correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). A escala de cores representa a intensidade do coeficiente de correlação (r), variando de -1 (vermelho, correlação negativa perfeita) a +1 (azul, correlação positiva perfeita).

A outra correlação positiva forte existente, é entre NVP e NGP que pode ser explicada por meio dos efeitos sinérgicos que ocorrem entre as BPCPs. Elas impactam na eficiência da FBN, que incrementa na funcionalidade dos nódulos e a disponibilidade de nitrogênio, refletindo maior número de vagens e grãos (Fipke *et al.*, 2016; Prando *et al.*, 2024; Steffen *et al.*, 2025) demonstrando dessa forma que, essa interação potencializa os benefícios para a cultura, tal como, a FBN e a promoção no crescimento vegetal que impactam nas melhorias nos aspectos gerais do vigor e saúde da planta, tornando-a mais produtivas, como demonstramos nos resultados das

tabelas anteriores. Além disso, o fato da cultivar utilizada ser de hábito de crescimento indeterminado, e a soja ter como característica a plasticidade fenotípica, pode ter influenciado nesse resultado. Ressalta-se que a densidade de semeadura adotada na presente pesquisa, foi definida de acordo com as recomendações técnicas da cultivar.

Houve correlação positiva e significativa entre os atributos de POP e NOD ($r=0,37$), POP e MFNOD ($r=0,39$) e POP e PG ($r=0,55$), ou seja, a população de plantas influenciou benéficamente nos nódulos e na produtividade dos grãos, pois em reduzidas populações há mais nódulos por planta e em maiores populações haverá menos nódulos. Esse fato ocorre porque há menor competição por recursos, o que permite o desenvolvimento da raiz e maior produção de nódulos (de Luca *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2021). Assim, pode-se levar em consideração que, em reduzidas populações, a maior disponibilidade de recursos por planta resultará em nódulos mais pesados e maiores (de Luca *et al.*, 2014), e a inoculação com *Bradyrhizobium* aliado aos fertilizantes orgânicos incrementam na massa de nódulos (Khan *et al.*, 2022; Senger *et al.*, 2023).

Quanto à correlação significativa entre produtividade de grãos e nodulação (nódulos e massa fresca), é uma situação diretamente proporcional, pois o incremento moderado no número de nódulos pode melhorar a produtividade, pois dessa forma haverá maior FBN afetando positivamente no crescimento da planta (Brunner *et al.*, 2015; Shen *et al.*, 2025).

Outra correlação foi entre a massa de 100 grãos e a massa seca de nódulos, onde essa relação positiva promoveu maior produtividade da soja. A coinoculação das bactérias diazotróficas incrementam a massa dos grãos em até 3,7% e a produtividade em até 240 kg ha⁻¹ em relação com a inoculação adicional (Fipke *et al.*, 2016; Moretti *et al.*, 2020) e essa coinoculação favorece o número e a massa seca de nódulos em até 26% no número de nódulos e 22% na massa seca (Steffen *et al.*, 2025).

Por outro lado, as correlações negativas e significativas foram, o POP e NGP ($r=-0,41$), NOD e NGP ($r=-0,46$), MFNOD e NGP, ($r=-0,41$) e a POP e M100 ($r=-0,48$). Em alta população de plantas, pode ocorrer a competição por luz, água e nutrientes, dessa forma há redução dos recursos disponíveis por planta, isso pode dificultar a produção e massa de nódulos e grãos (Bulegon *et al.*, 2017; Golovina, 2022; Gonçalves *et al.*, 2023), por exemplo, locais onde há recursos limitados, a alocação de assimilados irá priorizar o crescimento vegetativo, ao invés das estruturas reprodutivas ou de nódulos (Bulegon *et al.*, 2017; Golovina, 2022).

Além disso, os nódulos e a FBN são processos de alta demanda energética, e quando há alta população de plantas, ocorre a competição por fotoassimilados, podendo reduzir a energia disponível para formação de novos nódulos e consequentemente haverá reduzido número ou serão menores. Da mesma forma, o número e a massa de grãos serão reduzidos em virtude das plantas priorizarem a sobrevivência ao invés da reprodução (Bulegon *et al.*, 2017; Golovina, 2022).

A presença do *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* no solo incrementa a FBN e nódulos em situações ótimas, porém, com alta população de plantas, esses benefícios podem ser reduzidos em virtude do aumento da competição entre as plantas, levando a queda na nodulação e produção de grãos (Bulegon *et al.*, 2017; Zeffa *et al.*, 2020; Nader *et al.*, 2024)

As demais cores claras (Figura 24) são correlações negativas ou positivas, que sugerem um efeito da baixa correlação e sem significância entre as variáveis.

Para a safra 2024 (Figura 25), as correlações mais expressivas foram observadas entre os componentes de nodulação. Houve destaque para a associação entre MFNOD e Massa Seca de Nódulos (MSNOD), que atingiu $r = 0,82$, em virtude da variável no eixo x aumentar (MFNOD) de acordo com a variável no eixo y que também aumenta (MSNOD), ou seja, a planta produz maior massa fresca dos nódulos e também maior massa seca de nódulos (Tanya *et al.*, 2006).

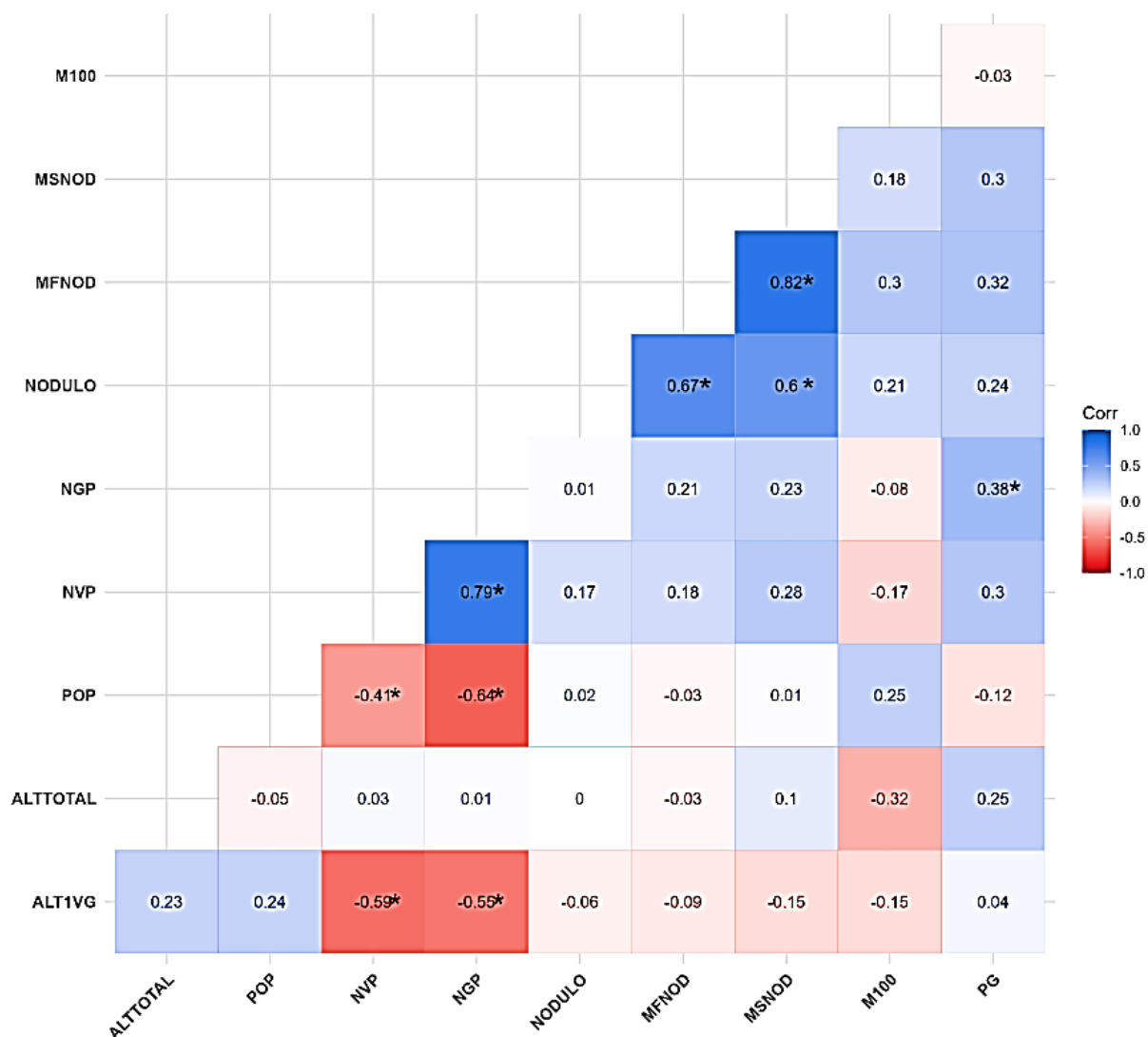
Esse resultado pode ser atribuído ao efeito sinérgico da interação entre as bactérias e suas diferentes formas de inoculação e inoculação adicional, que trabalharam em conjunto para promover o desenvolvimento das raízes, incrementar a nodulação e consequentemente, beneficiar na FBN, possibilitando a produção de nódulos maiores e eficientes, o que se reflete na massa fresca e consequentemente na massa seca. Ademais, a correlação positiva do nódulo com a massa fresca e seca ($r = 0,67$, $r = 0,60$), respectivamente, é proveniente da coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* que aumentaram o número de nódulos e consequentemente a massa fresca dos nódulos (Steffen *et al.*, 2025).

Os componentes de produção, NVP e NGP, apresentam correlação positiva muito forte ($r = 0,79$), ou seja, a planta produz mais grãos de acordo com o maior número de vagens. Como foi demonstrado anteriormente, a associação entre as BPCPs influencia positivamente nos aspectos de crescimento e desenvolvimento das plantas. Isso explica a forte relação benéfica observada na soja, uma vez que, alto desempenho da cultura pode incrementar na formação das vagens e enchimento dos

grãos, contudo, pelo efeito climático adverso (Figura 2B) na fase de enchimento de grãos, esse aumento de NVP e NGP não refletiu em ganhos de produtividade.

Diferente do ano anterior, a produtividade (PG) apresentou correlação significativa apenas com o número de grãos por planta ($r = 0,38$). Este fato ocorreu devido à relação simbiótica das bactérias diazotróficas utilizadas no presente estudo, promovendo melhorias na FBN, que estimulam o crescimento das raízes, onde pode incrementar no número de grãos em até 39% (Fipke *et al.*, 2016; Bi *et al.*, 2024) e consequentemente aumenta a produtividade da soja de 4% a 13,3% (Fipke *et al.*, 2016; Schneider *et al.*, 2017).

Figura 25 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis biométricas, componentes de rendimento e nodulação da cultura da soja na safra 2024.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Quadrantes preenchidos com asteriscos (*) indicam correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). A escala de cores representa a intensidade do coeficiente de correlação

(r), variando de -1 (vermelho, correlação negativa perfeita) a +1 (azul, correlação positiva perfeita).

Notou-se, ainda, correlações acentuadas entre o NGP e ALT1VG com correlação negativa forte ($r = -0,55$). Assim como, o NVP ($r = -0,59$) e ALT1VG tem correlação negativa forte, ou seja, a planta produz mais vagens e grãos quando a altura da inserção da primeira vagem está mais baixa.

Ressalta-se que a interação entre os microrganismos promove a produção de fitohormônios na planta, e em função dos fatores ambientais ideais, foi benéfica para o crescimento e desenvolvimento da haste principal e ramos e, consequentemente para a produção de vagens e sementes. Porém, a baixa altura da inserção da primeira vagem pode dificultar a colheita mecanizada, pois a plataforma de corte deve trabalhar rente à superfície do solo para colher as vagens no terço inferior, e dessa forma, ter perdas no campo. Além disso, diversos fatores podem ter afetado esses resultados, tais como, a densidade de semeadura, as condições ambientais e genética da cultivar (Braz *et al.*, 2019).

Houve relações negativas da POP com o NGP e NVP ($r = -0,64$ e $r = -0,41$), respectivamente. Esse resultado é em virtude da variável no eixo x que aumenta (NGP) de acordo com a variável no eixo y que diminui (POP), ou seja, há incremento no número de grãos quando as plantas possuem espaço para crescer e se desenvolver, sendo assim, uma resposta adaptativa ao ambiente. A soja de hábito indeterminado possui plasticidade fenotípica e responde às mudanças na densidade de plantas. Em baixa densidade, essa cultivar compensa a produção de vagens, ramos e consequentemente nos grãos por planta, em contrapartida, altas densidades podem reduzir o número de grãos por planta para se adaptar às possíveis competições por espaço (Egli, 1988; Noah e Mebelo, 2020).

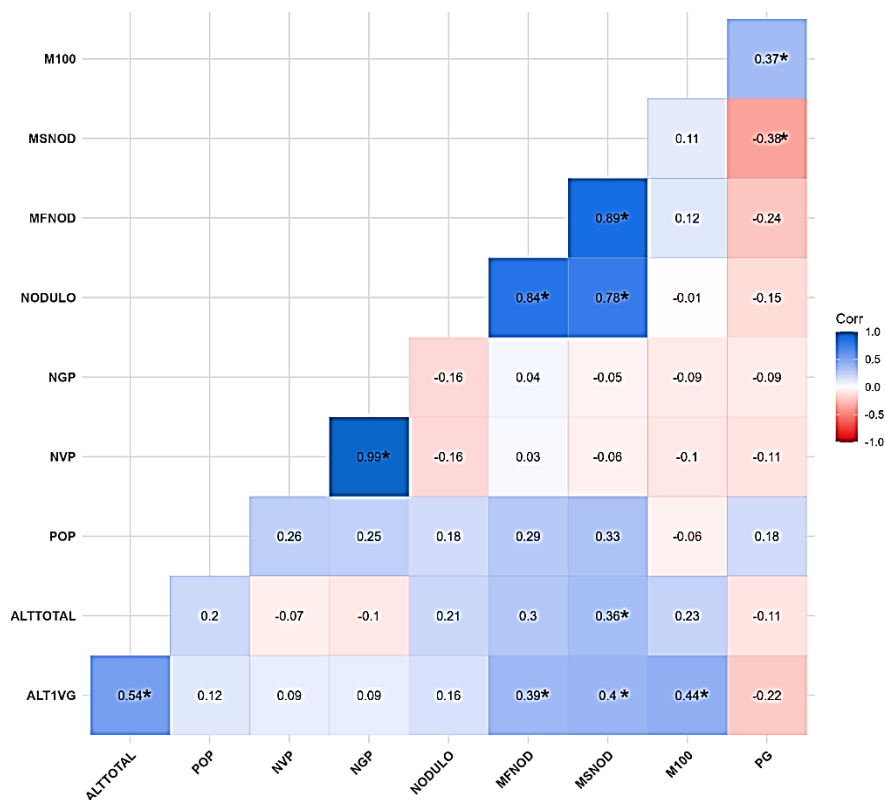
Além disso, deve-se levar em consideração todos os impactos já mencionados para introdução das BPCPs no sistema e como essa interação potencializa os benefícios para a cultura. Embora ambientes com alta taxa populacional ocasionem menor número de vagens e grãos por planta, devido à competição por nutrientes, água e luz, a inoculação pode atenuar esses resultados negativos (Barbosa *et al.*, 2023; Menegon *et al.*, 2024)

Na safra 2025 (Figura 26), houve mais relações positivas do que negativas entre os componentes de produção e produtividade da soja. A única correlação negativa nessa safra foi a PG e a MSNOD ($r = -0,38$), evidenciando que a dinâmica de

translocação de fotoassimilados pode variar conforme as condições ambientais de cada ciclo agrícola. No entanto, em condições de alta quantidade de nódulos, pode haver competição por assimilados entre os nódulos e a fase reprodutiva, podendo diminuir a produtividade de grãos (Golovina, 2022).

A ALT1VG apresentou diversas correlações positivas e significativas, dentre elas, com MSNOD, MFNOD, ALTOTAL e M100 ($r = 0,40$; $r = 0,39$, $r = 0,54$; $r = 0,44$, respectivamente). Essa relação pode ser proveniente de maior disponibilidade de nitrogênio por meio dos nódulos, que gerou maior vigor vegetativo e consequentemente afetou o deslocamento da inserção das vagens para posições mais elevadas. É comumente conhecido que a altura da inserção da primeira vagem possa interferir na altura e arquitetura de toda a planta, tal como, massa dos nódulos e altura da planta, indicando covariação entre essas variáveis no campo (Çelik *et al.*, 2020), além disso, a simbiose entre bactérias diazotróficas e os nódulos estimulam a produção de hormônios como citocinina, que regulam o crescimento das gemas e alongam o caule.

Figura 26 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis biométricas, componentes de rendimento e nodulação da cultura da soja na safra 2025.



Fonte: produção da própria autora.

Legenda: Quadrantes preenchidos com asteriscos (*) indicam correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). A escala de cores representa a intensidade do coeficiente de correlação (r), variando de -1 (vermelho, correlação negativa perfeita) a +1 (azul, correlação positiva perfeita).

A relação positiva entre ALTOTAL e ALT1VG, evidencia que quanto mais nós ou entrenós, aumenta a distância do solo até o primeiro nó fértil, movendo a primeira vagem para cima (Murlidharan, 2017), além disso, fatores genéticos podem influenciar na maior estatura e conseqüentemente na maior altura da inserção da primeira vagem (Murlidharan, 2017). Também fatores ambientais influenciam, pois, as plantas que estão sombreadas ou em áreas com alta densidade populacional podem alongar os entrenós e conseqüentemente aumentar a altura das plantas.

Identificou-se correlação positiva quase perfeita entre NVP e NGP ($r = 0,99$), indicando estabilidade na proporção de grãos por vagem. A alta correlação entre essas variáveis sugere que a coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* aumentou a produção de vagens e grãos de soja (Toniato *et al.*, 2020).

A nodulação continuou a apresentar fortes associações (NODULO vs MFNOD, $r = 0,84$), onde os incrementos no número de nódulos, geralmente, acompanham aumento na massa de cada nódulo. A coinoculação de *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* modificou a dinâmica ao favorecer a nodulação precoce e incrementar o número e a massa dos nódulos, especialmente no período inicial de crescimento da soja (Picoli *et al.*, 2022).

Quanto aos impactos na M100, há uma correlação indireta pois há associação entre rendimento e aos fatores ambientais, o que reduz a consistência da correlação direta (Rychel-Bielska *et al.*, 2025). A M100 se correlacionou moderadamente com a PG ($r = 0,37$), sendo que a coinoculação dos microrganismos, impactaram tanto o incremento da produtividade quanto na massa dos grãos em condições favoráveis, porém os ganhos na produtividade frequentemente favorecem mais no aumento do número de grãos do que no aumento da massa individual (Picoli *et al.*, 2022).

Em relação à MSNOD houve diversas correlações positivas e significativas, dentre elas, MFNOD e NOD e ALTOTAL ($r = 0,89$; $r = 0,78$; $r = 0,36$), demonstrando que, mesmo que a planta envie toda sua energia para criar nódulos maiores e mais numerosos, nem sempre incrementará na fixação efetiva por unidade de tempo, além disso, o nitrogênio que foi fixado pela planta pode ser utilizado para produção de sementes ou reenviado, sem grande aumento para a altura total da planta (Chibeba

et al., 2020; Picoli *et al.*, 2022)

7.3.8 Análise de Regressão Linear entre Safras

Para seleção das variáveis independentes e análise de regressão linear, adotou-se o critério com base nos resultados obtidos nas Matrizes de Correlação de Pearson (Figuras 24, 25 e 26). Foram selecionadas apenas as variáveis que apresentaram os maiores coeficientes de correlação (r), com a variável dependente Produtividade de Grãos (PG), em cada safra específica.

Essa estratégia, conhecida como "triagem por correlação", visa identificar os componentes biométricos e de nodulação que possuem maior potencial de explicação sobre a produtividade, evitando a inclusão de variáveis com baixa associação estatística, o que poderia gerar modelos de regressão sem significância prática (Tabela 18).

Na safra 2023, a produtividade apresentou dependência significativa e positiva de fatores populacionais e de eficiência simbiótica entre os microrganismos. A POP foi o principal preditor ($R^2 = 0,30$; $p = 0,0011$), indicando que cada planta adicional na área, contribuiu com um ganho médio de 0,017 kg (ou 17 kg para cada mil plantas), tornando evidente que o arranjo espacial impactou na produtividade, e a presença da *Azospirillum* que secreta auxinas, sendo considerado um promotor de crescimento de plantas, auxilia para uma emergência mais uniforme (Dhiman *et al.*, 2022), o que garantiu que, mesmo em altas populações, e com intensificação produtiva realizada de modo sustentável, torna o sistema radicular vigoroso por causa da *Azospirillum*, e foi eficaz para garantir a sobrevivência da soja na competição intraespecífica que normalmente ocorre no solo.

Tabela 18 – Parâmetros estatísticos dos modelos de regressão linear simples para a produtividade de grãos (PG) em função das variáveis biométricas e de nodulação de maior correlação nas safras 2023, 2024 e 2025.

(Continua)					
Safra	Variável Independente (x)	Equação de Regressão ($y = ax + b$)	Coefficiente (R^2)	Valor-p	Tendência
2023	POP (População)	$y = 0,017x + 1300$	0,30	0,001	Positiva
2023	NODULO (Nº Nódulos)	$y = 37x + 4000$	0,19	0,013	Positiva

Safra	Variável Independente (x)	Equação de Regressão ($y = ax + b$)	Coefficiente (R^2)	Valor-p	Tendência
2023	MFNOD (M. Fresca Nód.)	$y = 1300x + 4200$	0,13	0,042	Positiva
2024	NGP (Nº Grãos/Planta)	$y = 5,9x + 1500$	0,14	0,034	Positiva
2024	MFNOD (M. Fresca Nód.)	$y = 190x + 1600$	0,10	0,075	Positiva
2024	MSNOD (M. Seca Nód.)	$y = 470x + 1600$	0,092	0,091	Positiva
2025	MSNOD (M. Seca Nód.)	$y = -8,2x + 92$	0,14	0,033	Negativa
2025	M100 (massa de 100 Grãos)	$y = 2,3x + 44$	0,13	0,039	Positiva
2025	MFNOD (M. Fresca Nód.)	$y = -3,5x + 88$	0,05	0,180	Negativa
(Conclusão)					

Fonte: produção da própria autora.

Legenda: x representa a variável independente; y representa a produtividade de grãos (PG); R^2 é o coeficiente de determinação; Valor-p indica a probabilidade de erro; ** indica significância ao nível de 1% ($p < 0,01$); * indica significância ao nível de 5% ($p < 0,05$); ns indica relação não significativa ($p > 0,05$).

A FBN contribuiu diretamente na produtividade, e o número de nódulos (NODULO ($R^2 = 0,19$; $p = 0,013$)) proporcionou acréscimo estimado de 37 kg ha⁻¹ para cada nódulo adicional por planta, enquanto a MFNOD ($R^2 = 0,13$; $p = 0,042$) reforçou que o desenvolvimento radicular suportou o potencial de produção dessa safra, reforçando a ideia de que os microrganismos inoculados são uma estratégia simples, barata e sustentável que realmente funciona. Segundo Teixeira *et al.* (2022), a coinoculação de *Azospirillum* promove o crescimento radicular e aumenta a longevidade dos nódulos que foram formados pelo *Bradyrhizobium*, demonstrando que no presente estudo, além do fornecimento da FBN, a simbiose entre as bactérias otimizou a produtividade e com alta eficiência.

Enquanto que a MFNOD reforçou a ideia de que o desenvolvimento radicular impactou no potencial produtivo deste ano, a relevância estatística dos nódulos demonstra que a inoculação adicional e coinoculação com *Azospirillum brasilense* foram favoráveis para a soja. A coinoculação potencializa a produção de fitohormônios, aumentando o volume radicular e, conseqüentemente, os sítios de infecção por *Bradyrhizobium* (Franchi, 2020; Santos *et al.*, 2021). O ganho por nódulo é a evidência prática do sinergismo entre essas bactérias que atuam de forma complementar na rizosfera (Santos *et al.*, 2021).

Em relação ao ano agrícola de 2024, os componentes individuais de rendimento se tornaram mais evidentes. O NGP foi destaque como o principal fator com significância ($R^2 = 0,14$; $p = 0,034$), onde cada grão adicional por planta elevou a

produtividade em cerca de 5,9 kg ha⁻¹. A Manutenção da palhada do SPD influencia a relação microrganismos, solo e planta auxiliando na produtividade dos grãos, mesmo quando a resposta imediata aos nódulos é menos pronunciada (Ashworth *et al.*, 2020; Crusciol *et al.*, 2021).

Embora a nodulação, representada por MFNOD ($R^2 = 0,10$; $p = 0,075$) e MSNOD ($R^2 = 0,092$; $p = 0,091$), tenha mantido tendência de crescimento, os modelos não atingiram significância ao nível de 5%, indicando uma resposta linear menos acentuada da simbiose sobre a produtividade neste ano específico, com baixa produtividade em condições de estresse abiótico (Figura 2B).

A variação de resultados que ocorrem entre as safras é comum de acontecer em sistemas agrícolas tropicais e pode existir em decorrência da reentrada das bactérias que foram realizadas na área experimental, a resiliência da população microbiana já existente, as variações climáticas que ocorreram nesse ciclo e os efeitos da primeira safra do consórcio do sorgo e capim Piatã. Perturbações no sistema ou variações na população de microrganismos podem modificar a eficiência das bactérias introduzidas (Lourenço *et al.*, 2018; Timm *et al.*, 2018).

Na última safra (2025), a M100 correlacionou-se positivamente com a produtividade ($R^2 = 0,13$; $p = 0,039$), onde, com cada grama adicional na massa de 100 grãos de soja resultou em incremento de 2,3 kg ha⁻¹, confirmando que o enchimento de grãos foi o fator primordial para o sucesso da colheita. Esse acréscimo na massa do grão pode estar relacionado aos consórcios (sorgo e capins) antecessores, aliado ao SPD, às duas safras anteriores de soja, fatores ambientais favoráveis e o vigor proporcionado pelas coinoculações realizadas nos anos anteriores, que favoreceram a absorção dos nutrientes e a fotossíntese (Bashan *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2021)

Em contrapartida, as variáveis de nódulos apresentaram tendência de inversão. A MSNOD apresentou regressão negativa significativa ($R^2 = 0,14$; $p = 0,033$), com uma redução estimada de 8,2 kg ha⁻¹ para cada unidade de massa seca produzida nos nódulos. Esse fato pode ser proveniente da competição por fotoassimilados (relação dreno-fonte), onde houve um envio de energia para a biomassa nodular e não para as reservas dos grãos. Embora a FBN supra as necessidades de nitrogênio da planta, o custo energético para produzir os nódulos é muito alto, e pode, em algumas ocasiões de estresse ou final de ciclo, penalizar o enchimento dos grãos. Esse antagonismo indica a necessidade do uso de estirpes que sejam competitivas

no solo e simbioticamente eficientes no equilíbrio da fisiologia da planta (He *et al.*, 2014; Cardoso *et al.*, 2016).

7.3.9 Considerações finais

A coinoculação influenciou de modo expressivo nas trocas gasosas na safra de 2025, e embora sob condições de altas temperaturas nesse período, as plantas mantiveram taxas fotossintéticas estáveis e elevaram a condutância estomática. Isso demonstra que a produção de fitormônios pelas bactérias promoveu um resfriamento térmico via transpiração, embora a um custo maior de eficiência no uso da água.

Observou-se que ocorreu uma evolução na qualidade da nodulação ao longo das safras, em virtude do número de nódulos ter oscilado conforme o clima, as MFNOD e MSNOD atingiram seu maior valor em 2025. Esse resultado indica que as sucessivas inoculações e o ambiente estável do SPD favoreceram estirpes mais competitivas e eficientes, favorecendo a FBN e consequentemente na sobrevivência da soja.

A soja demonstrou alta plasticidade fenotípica para compensar variações no estande, sendo no ano de 2023, o maior número de grãos por planta e a massa de 100 grãos compensaram populações reduzidas em alguns tratamentos. Em 2024, os componentes de produção foram favorecidos pela maior altura de inserção da primeira vagem, característica essencial para a eficiência da colheita mecanizada. No ano agrícola de 2025, a produtividade foi maior na presença da combinação das bactérias que promoveram maior população de plantas e a Massa de 100 grãos.

Portanto, o uso do *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* em áreas de SPD consolidado mostrou-se uma estratégia eficaz não apenas para o fornecimento de nitrogênio, mas como um regulador do crescimento vegetal. A presença das BPCPs favoreceu desde aumentar a inserção de vagens até a tolerância a estresses abióticos, reafirmando que a coinoculação é benéfica para a produção da soja, visando a sustentabilidade econômica do sistema.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO-CASAS, M.; BLANCO, C.; FAJARDO-MOLINA, S.; PÉREZ, J.; FERNÁNDEZ-PASCUAL, M. Respuesta de soya (*Glycine max* (L) Merr) a la inoculación con *Azospirillum* y *Bradyrhizobium*. **Cultivos Tropicales**, v. 40, n. 1, p. 2 2019. DOI:10.1234/ct.v40i1.1491
- ASHWORTH, A.J.; OWENS, P.R.; ALLEN, F.L. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, 2020. Article 114062, DOI:10.1016/j.geoderma.2019.114062
- BARBOSA, H. M.; ALVAREZ, R.C. F.; DE LIMA, S. F.; CORDEIRO, M. A. S.; ZANELLA, M. S.; BERNARDO, V. F. *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* co-inoculation associated with cobalt and molybdenum application in the soybean crop. **Ciencia Rural**, v.53, n. 7, 2023. DOI: 10.1590/0103-8478cr20210871
- BARBOSA, J. Z.; HUNGRIA, M.; SENA, J. V. DA S.; POGGERE, G.; DOS REIS, A. R.; CORRÊA, R. S. Meta-analysis reveals benefits of co-inoculation of soybean with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium* spp. in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 163, n. 103913, 2021. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103913
- BARROS, L. H. D. S.; MAGALHÃES, M. O. L.; DALBIANCO, A. B.; MARTINEZ, R. A. S.; FIDELIS, R. R.; ROSA, H. H. R. Soybean inoculation techniques for the region of Tangará da Serra - MT, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, e724986029, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.6029
- BASHAN, Y.; HOLGUIN, G.; LUZ, E. *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). **Canadian Journal of Microbiology**, v. 50, n. 8, p. 521-577, 2004.
- BI, Y.; VENTILADOR, C.; LIANG, W.; LIAO, Y.; HAN, D. et al. Combination Effects of Sulfur Fertilizer and *Rhizobium* Inoculant on Photosynthesis Dynamics and Yield Components of Soybean. **Agronomy**, v.14, n. 4, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14040794
- 86
- BRAZ, L. B. P.; SILVA, A. G.; BRAZ, G. B. P.; FERREIRA, C. J. B.; PROCÓPIO, S. O.; BRAZ, A. J. B. P. Interference of Volunteer Corn on Soybean Grown under Cerrado Conditions. **Planta Daninha**, 37, 2019. DOI: 10.1590/s0100-83582019370100099
- BRUNNER, S.M.; GOOS, R.J.; SWENSON, S.J.; FOSTER, S.P.; SCHATZ, B.G.; LAWLEY, Y.E.; PRISCHMANN-VOLDSETH, D.A. Impact of nitrogen fixing and plant growth-promoting bacteria on a phloem-feeding soybean herbivore. **Applied Soil Ecology**, v. 86, p. 71-81, 2015. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.10.007
- BUCKLEY, T.N. How do stomata respond to water status? **New Phytol**, v. 224, n. 1, p.21-36, 2019. DOI: 10.1111/nph.15899.

BULEGON, L. G. et al. Growth and gas exchange in the vegetative period of soy inoculated with bacteria diazotrophic. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 5, p. 277-286, 2016. DOI: 10.14583/2318-7670.v04n05a03

BULEGON, L. G.; GUIMARÃES, VANDEIR F.; KLEIN, J.; BATTISTUS, A. G.; INAGAKI, A. M.; OFFEMANN, L. C.; DE SOUZA, A. K. P. Enzymatic activity, gas exchange and production of soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* and *Azospirillum brasilense*. **Australian Journal of Crop Science**, V. 11, N. 7, P. 888-896, 2017. DOI: 10.21475/ajcs.17.11.07.pne575

BURG, G. M.; FERREIRA, M. M.; VEY, R. T.; CECHEIN, J.; FULANETI, F. S.; FIPKE, G. M.; NUNES, R. L. S.; MARTIN, T. N. Planting speed and coinoculation in soybeans . Acta Scientiarum – **Agronomy**, v. 47, v. 1, e72415, 2025. DOI: 10.4025/actasciagron.v47i1.72415

CAMPO, R. J.; ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Nitrogen fixation with the soybean crop in Brazil: Compatibility between seed treatment with fungicides and bradyrhizobial inoculants. **Symbiosis**, v. 48, p. 154-163, 2009. DOI: 10.1007/BF03179994

CANELLAS, L. P. et al. Foliar application of plant growth-promoting bacteria and humic acid increase maize yields. **Journal of Food Agriculture Environment**, v.1313, n. 11, p. 131-138, 2015.

CARDOSO, E. J.B.N.; ANDREOTTE, F. D. **Microbiologia do solo**. 2º ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. P. 221. ISBN: 978-85-86481-56-7.

CARDOSO, J. D.; GOMES, D. F.; GOES, K. C.; FONSECA, N. S.; DORIGO, O. F.; HUNGRIA, M.; ANDRADE, D. S. Relationship between total nodulation and nodulation at the root crown of peanut, soybean and common bean plants. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 8, p. 1760-1763, 2009. DOI: 10.1016/j.soilbio.2009.05.008

ÇELİK, Ş.; ERKAN, B. Description of the relationships between different plant characteristics in soybean using multivariate adaptive regression splines (MARS) algorithm. **Agricultural and Food Sciences**, v.1, n. 1, 2020. DOI:10.36899/japs.2020.2.0037

CHAOUKI, H.; KHOURLI, S.; ELHAISOUFI, W.; IDBELLA, M.; IBNYASSER, A.; ET AL. Phosphate-solubilizing inoculants induce stage-specific rhizosphere microbiome shifts and enhance chickpea symbiosis under low P availability. **Biology and Fertility of Soils**, 2026. ISSN 01782762 DOI: 10.1007/s00374-026-01989-7

CHEN, T.; XIA, G.; CHI, D.; LIU, T.; CHEN, W. Assessment of Drought Impact on Main Cereal Crops Using a Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Liaoning Province, China. **Sustainability**, v. 8, n.10, p. 1069, 2016. DOI:10.3390/su8101069

CHIBEBA, A. M.; GUIMARÃES, M. de F.; BRITO, O. R.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Co-Inoculation of Soybean with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* Promotes Early Nodulation. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 10, p. 1641–1649, 2015. DOI:10.4236/ajps.2015.610164

CHIBEBA, A. M.; KYEI-BOAHEN, S.; GUIMARÃES, M. F.; NOGUEIRA, A.; HUNGRIA, M. Towards sustainable yield improvement: field inoculation of soybean with *Bradyrhizobium* and co-inoculation with *Azospirillum* in Mozambique, **Archives of Microbiology**, v. 202, n. 9, p. 2579–2590, 2020, DOI: 10.1007/S00203-020-01976-Y.

COATTI, G. C.; ANDRADE, D.S.; CARDOSO, J.D.; MATOS, M.A. Produção de AIA e diversidade fenotípica de estirpes elite de Rizóbio isoladas de feijoeiro. **Journal. Health Science**, v.12, n. 1, p. 49-53, 2010.

COHEN, A.C.; BOTTINI, R.; PONTIN, M.; BERLI, F.J.; MORENO, D.; BOCCANLANDRO, H.; TRAVAGLIA, C.N.; PICCOLI, P.N. *Azospirillum brasilense* ameliorates the response of *Arabidopsis thaliana* to drought mainly via enhancement of ABA levels. **Physiol Plantarum**, v. 153, p. 79-90, 2014. DOI: 10.1111/ppl.12221

COLLINO, D.J.; SALVAGIOTTI, F.; PERTICARI, A.; PICCINETTI, C.; OVANDO, G.; URQUIAGA, S.; RACCA, R.W. Biological Nitrogen Fixation in Soybean in Argentina: Relationships with Crop, Soil, and Meteorological Factors. **Plant Soil**, v.392, 239–252, 2015. DOI:10.1007/s11104-015-2459-8

CRUSCIOL, C.A.C.; MOMESSO, L.; PORTUGAL, J.R.; COSTA, C.H.M.; BOSS OLANI, J.W.; COSTA, N.R.; PARIZ, C.M.; CASTILHOS, A.M. RODRIGUES, V.A .; COSTA, C.; FRANZLUEBBERS, A.J.; CANTARELLA, H. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, 2021. Article 114062, DOI:10.1016/j.fcr.2020.108008

DAVIES, P.J. The plant hormones: Their nature, occurrence, and functions. In: P.J. Davies, editor, *Plant hormones* p. 1–15, 2010. DOI:10.1007/978-1-4020-2686-7

DE LUCA, M. J.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Feasibility of lowering soybean planting density without compromising nitrogen fixation and yield. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 6 p. 2118-2124. DOI: 10.2134/agronj14.0234

DE SOUZA, H. A.; VIEIRA, P. F.M.J.; ROZANE, D. E.; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the northeast of Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 44, p. 1-14, 2020. DOI: 10.36783/18069657rbcS20190125

DERETTI, A.F.H.; SANGOI, L.; JUNIOR, M.C.M.; GULARTE, P.S.; CASTAGNETI, V.; LEOLATO, L.S.; KUNESKI, H.F.; SCHERER, R.L.; BERKENBROCK, J.; DUARTE, L. Response of soybean cultivars to plant density reduction in the northern Santa Catarina Plateau. **Revista Ciências Agroveterinárias**, v.21, n.2, p. 123–136, 2022. DOI:10.5965/223811712122022123.

DHIMAN, V.K.; RANA, N.; DHIMAN, V.K.; PANDEY, H.; VERMA, P.; SINGH, D. Effect of rhizobial isolates and nitrogen fertilizers on nursery performance, nodulation behavior and nitrogen activity *Dalbergia sissoo* Roxb. seedlings. **Plant Stress**, v. 4, 2022. DOI:10.1016/j.stress.2022.100080

EBMEYER, H.; HOFFMANN, C.M. EFFICIENCY of nitrogen uptake and utilization in sugar beet genotypes. **Field Crops Res**, n. 274, p. 108334, 2021. DOI:10.1590/S1806-66902013000300025

EGLI, D. B. Plant Density and Soybean Yield. **Crop Science**, v. 28, n. 6, p. 977–981, 1988. DOI: 10.2135/cropsci1988.0011183x002800060023x

ENGELL, I.; LINSLER, D.; SANDOR, M.; JOERGENSEN, R.G.; MEINEN, C.; POTTHOFF, M. The effects of conservation tillage on chemical and microbial soil parameters at four sites across **Europe**. **Plants**, v.11, n. 13, p. 1-12, 2022. DOI: 10.3390/plants11131747

EPSTEIN, E.; A.N.N.D. P Bloom. 2006. Princípios e perspectivas. Editora Planta, Londrina, Brazil

ESPINOSA-VICTORIA, D.; GRAHAM, P. H.; VANCE, C. P. Host Variation in Traits Associated with Crown Nodule Senescence in Soybean. **Crop Science**, v. 40, n. 1, p. 103–109, 2000. DOI: 10.2135/cropsci2000.401103

FIPKE, G. M.; CONCEIÇÃO, G. M.; GRANDO, L. F. T.; LUDWIG, R. L.; NUNES, U. R.; MARTIN, T. N. Co-inoculation with diazotrophic bacteria in soybeans associated to urea topdressing. Federal University of Lavras, v.40, n. 5, p. 522-533, 2016. DOI: 10.1590/1413-70542016405001316

FRANCHI, L. *Bradyrhizobium e Azospirillum*: o que são, sinergia e importância. Agroinovadores. 2020. Disponível em: <https://agro.genica.com.br/2020/07/20/bradyrhizobium-e-azospirillum/>. Acesso em: 20 jan. 2021

FÜZY, T. A. Symbiotic Effectivity of Dual and Tripartite Associations on Soybean (*Glycine max* L. Merr.) Cultivars Inoculated With *Bradyrhizobium japonicum* and AM Fungi. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. 374091, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01631.

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; LUDKIEWIC, M. G. Z.; ROSA, P. A. L.; TRITAPEPE, C. A. Technical and economic viability of co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars in the Cerrado. **Rev. bras. eng. agríc. Ambient**, v. 22, n.1, p. 51-56, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p51-56

GOLOVINA, E. V. Symbiotic Nitrogen Fixation of Northern Ecotype Soybean Varieties Cultivated in the Conditions of the Central Black Earth Region. **Lecture Notes in Networks and Systems**, v. 372, p. 101-112, 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-93155-1_13

GÓMEZ, M.M.; MERCADO, E.C.; PINEDA, E.G. *Azospirillum* una rizobacteria con uso potencial en la agricultura. **Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agrícolas**, v. 16, n. 1, p. 11–18, 2014

GONÇALVES, G. C.; FERBONINK, G. F.; HEMKEMEIER, C.; CAIONE, G.; YAMASHITA, O. M.; LUIZ, S. A. R.; DE CARVALHO, M. A. C. Vegetative and productive characteristics of soybean under doses of boron and inoculation of *Trichoderma atroviride*. **Chilean Journal of Agricultural Research**, V. 83, N. 2, P. 159-167, 2023. DOI: 10.4067/S0718-58392023000200159

GOUFO, P.; KLUVER, R. W.; CERRUDO, A.; NAEVE, S. L. Insights into management and physiological determinants of lowest pod height in soybean. **Agronomy Journal**, v.116, n. 6, p. 3191-3204, 2024. DOI: 10.1002/agj2.21702

GUTIERREZ, L.; WUYTSWINKEL, O.V.; CASTELAIN, M.; BELLINI, C. Combined networks regulating seed maturation. **Trends Plant Science**, v. 12, p. 294–300, 2007. DOI:10.1016/j.tplants.2007.06.003

HALLAM, S.J.; MCCUTCHEON, J.P. Microbes don't play solitaire: how cooperation trumps isolation in the microbial world. **Environmental Microbiology Reports**, v. 7, n. 1, p. 26–28, 2015. DOI: 10.1111/1758-2229.12248

HE, X.; MCLEAN, J. S.; GUO, L.; LUX, R.; SHI, W. The social structure of microbial community involved in colonization resistance. **The ISME journal**, v. 8, n. 3, p. 564–574, 2014.

HU, Y. et al. Enhancing Soybean Yield: The Synergy of Sulfur and Rhizobia Inoculation. **Plants**, v. 12, n. 22, p. 3911, 2023. DOI:10.3390/plants12223911

HUNGRIA, M. et al. Soybean Seed Co-Inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: A New Biotechnological Tool to Improve Yield and Sustainability. **American Journal of Plant Sciences**, v. 6, n. 6, p. 811-817, 2015. DOI: 10.4236/ajps.2015.66087

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. **Fixação biológica de nitrogênio**. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). Tecnologias de produção de soja. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 347 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. **Tecnologias de inoculação da cultura da soja: mitos, verdades e desafios**. In: KAPPES, C. (Ed.). Boletim de Pesquisa 2019/2020. Rondonópolis: Fundação MT, p. 50-62, 2019 (Fundação MT. Boletim, 19).

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; ARAUJO, R.S. Alternative methods of soybean inoculation to overcome adverse conditions at sowing. **African Journal Agriculture**, v. 10, p. 2329-2338, 2015. DOI: 10.5897/AJAR2014.8687

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; ARAUJO, R.S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve Sustainability **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, p. 791-801, 2013. DOI:10.1007/s00374-012-0771-5

HUTCHISON, C. M. W.; WALWORTH, J. L. Evaluating the effects of gross nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification on nitrogen fertilizer availability in soil experimentally contaminated with diesel. **Biodegradation**, v. 18, p. 133-144, 2007. DOI: 10.1007/s10532-006-9049-7

INNOSENSIA, N. L. P. C.; NARISAWA, K.; SUPUTRA, I. P. W.; WIRYA, G. N. A. S. First Report of Tripartite Symbiosis Potential among Soybean, *Bradyrhizobium japonicum*, and Dark Septate Endophytes. **Agronomy**, v. 13, n. 7, p.1788, 2023. DOI:10.3390/agronomy13071788

JARECKI, W. et al. Soybean Response to Seed Inoculation with *Bradyrhizobium japonicum* and/or Nitrogen Fertilization. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1025, 2024. DOI:10.3390/agriculture14071025

JARECKI, W.; BUCZEK, J.; JAŃCZAK-PIENIAŻEK, M. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) response to commercial inoculation with *Bradyrhizobium japonicum*. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 18, n. 5, p. 6713-6724, 2020. DOI:10.15666/aeer/1805_67136724

JESUS, A.P.D.; REIS, M.N.O.; LOURENÇO, L.L.; MOL, D.J.D.S.; BESSA, L.A.; BRASIL, M.D.S.; VITORINO, L.C. Agronomic Efficiency of Compost Extracts and Nitrogen-Fixing Bacteria in Soybean **Crops. Microorganisms**, v.13, n.341, 2025. DOI: 10.3390/microorganisms13020341

JESUS, E. C.; LEITE, R. A.; BASTOS, R. A.; ARAGÃO, O. O. S.; ARAÚJO, A.P. Co-inoculation of *Bradyrhizobium* stimulates the symbiosis efficiency of Rhizobium with common bean. **Plant and Soil**, v. 425, n. 1-2, p. 201-215, 2018. DOI: 10.1007/s11104-017-3541-1

JUGE, C.; PRÉVOST, D.; BERTRAND, A.; CHALIFOUR, F.P. BIPFUSA, M. Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with *Bradyrhizobium*, *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizae. **Applied Soil Ecology**, v. 61, p. 147-157, 2012. DOI: 10.1016/j.apsoil.2012.05.006.

KHAN, Z.; AHMAD, B.; NAUMAN K. M.; AYOUB K. M.; AHMAD, S.; BALOCH, A.; ZAIB B. X.; AHMAD, F.; UR RAHIM, H. Stand Establishment, Growth, and Yield Enhancement Response of Soybean to Inoculation and NPK Compound and Organic Fertilizers. **Gesunde Pflanzen**, v. 74, n. 4, p. 1123-1135, 2022. DOI: 10.1007/s10343-022-00706-2

KÜHLING, I. et al. Soybeans in high latitudes: effects of *Bradyrhizobium* inoculation in Northwest Germany and southern West Siberia. **Organic Agriculture**, v. 8, n. 2, p. 159-171, 2018. DOI: 10.1007/s13165-017-0181-y

KURM, V; SCHILDER, M.T.; HAAGSMA, W.K.; BLOEM, J.; SCHOLTEN, O.E; POSTMA, J. Reduced tillage increases soil biological properties but not suppressiveness against *Rhizoctonia solani* and *Streptomyces scabies*. **Applied Soil Ecology**, v.181, 2023, Article 104646.DOI: 10.1016/J.APSOIL.2022.104646

LI, X.; ZENG, R.; LIAO, H.; TAN, Z.; ZHAO, J. GmEXPB2, a Cell Wall β -Expansin, Affects Soybean Nodulation through Modifying Root Architecture and Promoting Nodule Formation and Development. **Plant Physiology**, v. 169, n. 4, p.01029, 2015. DOI:10.1104/pp.15.01029

LIU, F.; JENSEN, C.R.; ANDERSEN, M.N. Pod set related to photosynthetic rate and endogenous ABA in soybeans subjected to different water regimes and exogenous ABA and BA at early reproductive stages. **Annals of Botany**. v. 94, p. 405–411, 2004. DOI:10.1093/aob/mch157

LONG, S. P.; BERNACCHI, C. J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations of photosynthesis? Procedures and sources of error. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2393-2401, 2003. DOI: 10.1093/jxb/erg262.

LOURENÇO, K. S.; SULEIMAN, A. K. A.; PIJL, A.; VAN VEEN, J. A.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Resilience of the resident soil microbiome to organic and inorganic amendment disturbances and to temporary bacterial invasion. **Microbiome**, v. 6, p. 1–12, 2018.

LYNRAH, A.; NONGMAITHEM, D. Effect of Lime and Integrated Nutrient Management on Soybean under Rainfed Condition of Nagaland. **International Journal of Bio-resource and Stress Management**, v. 8, n. 5, p. 1818, 2017. DOI: 10.23910/IJBSM/2017.8.5.1818

MA, H.; EGAMBERDIEVA, D.; WIRTH, S.; LI, Q.; O., RICHARD, A.; HOU, M.; BELLINGRATH-KIMURA, S. D. Effect of Biochar and Irrigation on the Interrelationships among Soybean Growth, Root Nodulation, Plant P Uptake, and Soil Nutrients in a Sandy Field. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6542, 2019. DOI: 10.3390/su11236542.

MACHACULEHA, C. A.; FÁTIMA, G. M.; RODRIGUES, B. O.; NOGUEIRA, M.; SILVA, A. R.; HUNGRIA, M. Co-Inoculation of Soybean with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* Promotes Early Nodulation. **American Journal of Plant Sciences**, n. 6, p. 1641-1649, 2015. DOI: 10.4236/ajps.2015.610164.

MAHAPATRA, R.; MISHRA, P.; PATEL, Z. M. The molecular architecture of rhizobium-plant symbiosis in nitrogen fixation. **The Chemical Dialogue between Plants and Beneficial Microorganisms**, p. 137-144, 2023. DOI: 10.1016/B978-0-323-91734-6.00006-5

MARCHÃO, R.L.; SILVA, G.C.D.; ANDRADE, S.R.M.D.; JUNIOR, F.B.D.R.; JÚNIOR, M.P.D.B.; HAPHONSSO, R.H.; CARVALHO, A.M.D. Improving Soybean Development and Grain Yield by Complementary Inoculation with Growth-Promoting Bacteria *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Priestia*, and *Bacillus*. **Plants**, n.14, p. 402, 2025. DOI: 10.3390/plants14030402

MARTIN, T. N. Evaluation of *Trichoderma asperelloides*-based inoculant as growth promoter of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.): a field-scale study in Brazil. **Journal of Crop Science and Biotechnology**, v. 26, n. 3, p. 255-263. DOI: 10.1007/s12892-022-00177-x

MASCIARELLI, O., L.; URBANI, H.; REINOSO, V. L. Alternative mechanism for the evaluation of indole-3-acetic acid (IAA) production by *Azospirillum brasilense* strains and its effects on the germination and growth of maize seedlings. **Journal of Microbiology**, v. 51, p. 590–597, 2013. DOI:10.1007/s12275-013-3136-3

MATSUI, T.; SASAKI, I.; KUROSE, D.; OSAKA, Y.; TOBITANI, J.; YOSHIHIRA, T. Effect of Twin-row Cultivation on Growth, Yield, and Light-intercepting Characteristics of Soybean in Full-scale Cultivation **Crop Science Society of Japan**, v. 93, n. 4, p. 294-304, 2024. DOI: 10.1626/jcs.93.294

MEILHOC, E.; BOSCARI, A.; PAULY, N.; LEPETIT, M.; FRENDON, P.; BRUAND, C.; PUPPO, A.; BROUQUISSE, R. Oxygen and derived reactive species in legume-rhizobia interactions: Paradoxes and dual roles. **Journal of Experimental Botany**, v. 76, n. 13, p. 3758-3773, 2025. DOI: 10.1093/jxb/eraf160

MENEGON, A. H. M.; DE LIMA, S. F.; ALVES, V. C. D.; CONTARDI, L. M.; CORDEIRO, M. A. S.; VENDRUSCOLO, E. P.; DE CÁSSIA B. N. R.; NOGUEIRA, ARTHUR RENAN F. Soybean population management seeking greater grain productivity. **Revista de Gestao Social e Ambiental**, v.18, n. 2, 2024. DOI: 10.24857/RGSA.V18N2-017

MENNA, P.; HUNGRIA, M. Phylogeny of nodulation and nitrogen-fixation genes in *Bradyrhizobium*: Supporting evidence for the theory of monophyletic origin, and spread and maintenance by both horizontal and vertical transfer. **International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology**, v. 61, n. 12, p. 3052-3067, 2011. DOI: 10.1099/ijs.0.028803-0

MHADHBI, H.; JEBARA, M.; LIMAM, F.; AOUANU, M. E. Interaction between *Medicago truncatula* lines and *Sinorhizobium meliloti* strains for symbiotic efficiency and nodule antioxidant activities. **Physiologia Plantarum**, v. 124, n. 1, p. 4-11. 2005. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2005.00489.x

MICHELON, C.; STEINDORFF, T. G.; PINTO, T. E.; RUBIN, V. A. B.; SALIN, M. L.; JUNGES, E.; SCHOTT, A.; CARVALHO, F. Co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* and *Azospirillum brasilense* in the Soybean **Crop. Journal of Agricultural Science**, v. 12, n. 10, p.154, 2020. DOI: 10.5539/jas.v12n10p154

MOLLA, A. H.; SHAMSUDDIN, Z. H.; HALIMI, M. S.; MORZIAH, M., PUTEH, A. B. Potential for enhancement of root growth and nodulation of soybean co-inoculated with *Azospirillum* and *Bradyrhizobium* in laboratory systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v.33, n. 4–5, p. 457–463, 2001. DOI: 10.1016/s0038-0717(00)00186-3

MONDACA, P.; CELIS-DIEZ, J. L.; DÍAZ-SIEFER, P.; OLMOS-MOYA, N.; MONTERO-SILVA, F.; MOLINA, S.; FONTÚRBEL, F. E.; APONTE, H.; MANDAKOVIC, D.; BASTIDAS, B.; ARELLANO, E. C. LAVANDERO, B.; CARVAJAL, M.; GAXIOLA, A. Effects of sustainable agricultural practices on soil microbial diversity, composition, and functions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 370, p.109053, 2024. DOI: 10.1016/j.agee.2024.109053

MORETTI, L. G.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOSSOLANI, J. W.; CALONEGO, J. C.; MOREIRA, A.; GARCIA, A.; MOMESSO, L.; KURAMAE, E. E.; HUNGRIA, M. Beneficial microbial species and metabolites alleviate soybean oxidative damage and increase grain yield during short dry spells. **European Journal of Agronomy**, v. 127, p. 126293, 2021. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126293.

MORETTI, L.G.; CRUSCIOL, C.A.C.; LEITE, M.F.A. *et al.* Diverse bacterial consortia: key drivers of rhizosoil fertility modulating microbiome functions, plant physiology, nutrition, and soybean grain yield. **Environmental Microbiome**, v.19, n. 50, 2024. DOI: 10.1186/s40793-024-00595-0

MORETTI, LUIZ G.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOSSOLANI, J. W.; MOMESSO, L.; GARCIA, A.; KURAMAE, E. E.; HUNGRIA, M. Bacterial Consortium and Microbial Metabolites Increase Grain Quality and Soybean Yield. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 4, p. 1923-1934, 2020. DOI: 10.1007/s42729-020-00263-5

MURLIDHARAN, P. **Genetic Analysis of Traits Determining Seed Yield Over Environments in Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill)**. Department of Plant Breeding and Genetics Rajmata Vijayaraje Scindia Krishi Vishwa Vidyalaya College of Agriculture, Gwalior (M.P.) 2017. DOCTOR OF PHILOSOPHY

NADER, A. A.; HAUKA, F. I. A.; AFIFY, A. H.; EL-SAWAH, A. M. Drought-Tolerant Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi Mitigate the Detrimental Effects of Drought Stress Induced by Withholding Irrigation at Critical Growth Stages of Soybean (*Glycine max*, L.). **Microorganisms**, v. 12, n. 6, 2024. DOI: 10.3390/microorganisms12061123

NAMOZOV, F. *et al.* Agronomic Performance of Soybean with *Bradyrhizobium* Inoculation in Double-Cropped Farming. **Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 855, 2022. DOI:10.3390/agriculture12060855

NAOE, A. M. D. L.; NAOE, L. K.; CAMPOS, L. J. M.; SILVA, R. A. E.; PELUZIO, J. M. Co-inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean cultivars subjected to water deficit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 89–94, 2020. DOI:10.1590/1807-1929/agriambi.v24n2p89-94

NASCENTE, A. S. *et al.* Biomass, gas exchange, and nutrient contents in upland rice plants affected by application forms of microorganism growth promoters. **Environmental Science and Pollution Research**, v.24, n.3, p. 2956-2965, 2017. DOI: 10.1007/s11356-016-8013-2

NIMNOI, P.; PONGSILP, N.; LUMYONG, S. Co-inoculation of soybean (*glycine max*) with actinomycetes and *Bradyrhizobium japonicum* enhances plant growth, nitrogenase activity and plant nutrition. **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n. 3, p. 432–446, 2014. DOI: 10.1080/01904167.2013.864308

NOAH, M.; MEBELO, M. Responses of soybeans (*Glycine max* (L.) Merrill) associated with variable plant density stress applied at different phenological stages: Plasticity or elasticity? **African Journal of Biotechnology**, v. 19, n. 6, p. 307–319, 2020. DOI:10.5897/ajb2020.17096

OLDROYD, G.E.D. Speak, Friend, and Enter: Signalling Systems That Promote Beneficial Symbiotic Associations in Plants. **Nature Reviews Microbiology**, v. 11, p. 252–263, 2013. DOI:10.1038/nrmicro2990

PATRA, D.; PAL, K. K.; MANDAL, S. Inter-species interaction of bradyrhizobia affects their colonization and plant growth promotion in *Arachis hypogaea*. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 40, n. 8, 2024. DOI: 10.1007/s11274-024-04035-6

PAUFERRO, N.; GUIMARÃES, A.P.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. 15N Natural Abundance of Biologically Fixed N₂ in Soybean Is Controlled More by the *Bradyrhizobium* Strain than by the Variety of the Host Plant. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 10, p. 1694–1700, 2010. DOI:10.1016/j.soilbio.2010.05.032

PERILLI, S.; MOUBAYIDIN, L.; SABATINI, S. The molecular basis of cytokinin function. **Current Opinion in Plant Biology**, V. 13, N. 1, P. 21-26, 2010. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.09.018

PERRIG, D.; BOIERO, M.; MASCIARELLI, O.; PENNA, C.; RUIZ, O. Plant-growth-promoting compounds produced by two agronomically important strains of *Azospirillum brasilense*, and implications for inoculant formulation. **Applied. Microbiology and Biotechnology**, v. 75, p. 1143–1150, 2007. DOI:10.1007/s00253-007-0909-9

PICOLI, M. M. *et al.* Combination of *Azospirillum* and *Bradyrhizobium* on Inoculant Formulation Improve Nitrogen Biological Fixation in Soybean. **Journal of agricultural science**, v. 14, n. 4, p. 145–145, 2022, DOI: 10.5539/jas.v14n4p145.

PRANDO, A. M.; BARBOSA, J. Z.; OLIVEIRA, A. B.; NOGUEIRA, M. A.; POSSAMAI, E. J.; HUNGRIA, M. Benefits of soybean co-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense*: Large-scale validation with farmers in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 155, n. 127112. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127112

PROVOROV, N. A.; TIKHONOVICH, I. A. Agricultural microbiology and symbiogenetics: synthesis of classical ideas and construction of highly productive agroecosystems. **Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya**, v. 57, n. 5, p. 821-831, 2022. DOI: 10.15389/agrobiol.2022.5.821eng

PUENTE, M. L.; CASSÁN, F. D.; MOLINA, R. M.; GUALPA, J. L.; LOPEZ, G. A.; CARLETTI, S. M. The benefits of foliar inoculation with *Azospirillum brasilense* in soybean are explained by an auxin signaling model. **Symbiosis**, v. 76, n. 1, p. 41–49, 2017. DOI:10.1007/s13199-017-0536-x

QUEIROZ REGO, C. H.; CARDOSO, F. B.; DA SILVA CÂNDIDO, A. C.; TEODORO, P. E.; ALVES, C. Z. Co-inoculation with *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* Increases Yield and Quality of Soybean Seeds. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 6, p. 2302–2309, 2018. DOI:10.2134/agronj2018.04.0278

RAIEVSKA, I.; SCHOGOLEV, A. GENES OF PHOTOPERIODIC SENSITIVITY AND EARLY MATURITY E1-E4: dynamics of soybean growth in different daylength conditions. **Biologicni Studii**, v. 18, n. 3, p. 87–97. 2024. DOI: 10.30970/sbi.1803.784

RAMTEKE, R., SINGH, D., & MURLIDHARAN, P. Selecting soybean (*Glycine max*) genotypes for insertion height of the lowest pod, the useful trait for combine harvester. **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 82, n. 6, p. 511–5, 2012. DOI: 10.56093/ijas.v82i6.18890

REINA, E.; PELUZIO, J.M.; NAOE, A.M.D.L.; MONTEIRO, F.J.F..Effect of *Azospirillum brasilense* in gas exchanges and production of soybean. **Technology in Agronomy**, v. 4, n. e006, 2024. DOI: 10.48130/tia-0024-0003

RIBEIRO, D. F.; OLIVEIRA, L. C.A.; DOMINGUES, S. C.O.; TEIXEIRA, E. E. R.; CARVALHO, M. A.C.; YAMASHITA, O. M.; OLIVEIRA, J. C. Co-inoculation with *Azospirillum brasilense* and *Bradyrhizobium japonicum* in soybean in the first and third year of cultivation Tropical and Subtropical **Agroecosystems**, v. 23, n. 1, 2020. DOI: 10.56369/tsaes.2913

RONDINA, A. B. L.; SANZOVO, A. W. S.; GUIMARÃES, G. S.; WENDLING, J. R.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Changes in root morphological traits in soybean co-inoculated with *Bradyrhizobium* spp. and *Azospirillum brasilense* or treated with *A. brasilense* exudates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 537–549, 2020. DOI: 10.1007/s00374-020-01453-0.

RYCHEL-BIELSKA, S.; KSIĄŻKIEWICZ, M.; KURASIAK-POPOWSKA, D. *et al.* Molecular selection of soybean towards adaptation to Central European agroclimatic conditions. **J Appl Genetics**, v. 66, p. 29–45, 2025. DOI: 10.1007/s13353-024-00889-6

SANTACHIARA, G.; BORRÁS, L.; SALVAGIOTTI, F.; GERDE, J.A.; ROTUNDO, J.L. Relative Importance of Biological Nitrogen Fixation and Mineral Uptake in High Yielding Soybean Cultivars. **Plant Soil**, 418, 191–203, 2017. DOI: 10.1007/S11104-017-3279-9

SANTHANAM, R.; LUU, V. T.; WEINHOLD, A.; GOLDBERG, J.; OH, Y.; BALDWIN, I. T. Native root-associated bacteria rescue a plant from a sudden-wilt disease that emerged during continuous cropping. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, p. E5013– E5020, 2015

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: Lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e.0200128. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200128, 2021.

SAVALA, C. E. N.; WIREDU, A. N.; OKOTH, J. O.; KYEI-BOAHEN, S. Inoculant, nitrogen and phosphorus improves photosynthesis and water-use efficiency in soybean production. **The Journal of Agricultural Science**, p. 1-14, 2021 DOI: 10.1017/S0021859621000617

SCHNEIDER, F.; PANIZZON, LUIS C.; SORDI, A.; LAJÚS, CRISTIANO R.; CERICATO, A.; KLEIN, C. Agronomic efficiency of soybean culture (*Glycine max* (L.) Merrill) submitted to coinoculation. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 72-79, 2017. DOI: 10.5380/rsa.v18i4.52047

SENGER, M. URREA-VALÊNCIA, S.; NAZARI, M. T.; VEY, R. T.; PICCIN, J. S.; SHARMA, R.; KUMAR, D.; KAPOOR, N.; OHRI, P. Insights into the biodiversity, mechanisms and plant growth-promoting effects of *Bradyrhizobium* and its potential in sustainable agriculture: A review. **Pedosphere**, v. 36, n. 1, p. 147-164, 2026. DOI: 10.1016/j.pedsph.2025.06.017

SHEN, D.; BISSELING, T. Soybean breeders can count on nodules. **Trends in Plant Science**, v. 30, n. 1, p. 10-12, 2025. DOI: 10.1016/j.tplants.2024.09.013

SILVA, J. A.; SANTOS, P. A. B.; CARVALHO, L. G.; MOURA, E. G.; ANDRADE, F. R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e58854, 2020. DOI: 10.1590/1983-40632020v5058854.

SILVA, K. C.; LIMA, I.M.O.; CABRAL, R.C.; ZUFFO, A. M.; STEINER, F. Cowpea and Mungbean Response to Co-Inoculation of *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* and Molybdenum Application in Sandy Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 5, p. 677–689, 2022. DOI:10.1080/00103624.2022.2118310

SILVA, M. A. et al. Individual and combined growth-promoting microorganisms affect biomass production, gas exchange and nutrient content in soybean plants. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 33, n. 3, 2020. DOI:10.1590/1983-21252020v33n305rc

SILVA, M. A.; SOARES, A. C. S.; CARNIETTO, M. R. A.; BARBOSA, A. M. Increasing population density reduces soybean yield components and productivity. **Bioscience Journal**, v. 37, n. e37042. DOI: 10.14393/BJ-V37N0A2021-53612

SILVA, T. R.; RODRIGUES, R. T.; JOVINO, R. S.; SA, C.; JACKSON, R.; LEITE, J.; et al. Not just passengers, but co-pilots! Non-rhizobial nodule-associated bacteria promote cowpea growth and symbiosis with (brady)rhizobia. **Journal of Applied Microbiology**, v. 134, n. 1, 2023. DOI: 10.1093/jambio/lxac013

SINGH, S. R.; NAJAR, G. R.; AKHTAR, F. Characterization and classification of some apple growing soils of Kashmir. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 57, n.1, p. 81–84, 2009.

SOGUT, T. *Rhizobium* inoculation improves yield and nitrogen accumulation in soybean (*Glycine max*) cultivars better than fertiliser. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 34, n. 2, p. 115–120, 2010. DOI:10.1080/01140671.2006.9514395

SPAEPEN, S.; VANDERLEYDEN, J.; REMANS, R. Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism-plant signaling. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 31, p. 425–448, 2007. DOI:10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x

STEFFEN, G. P. K.; STEFFEN, R. B.; SCHÚ, A. L.; DA SILVA S. T. C.; DA COSTA, L. C.; DE SÃO JOSÉ, J. F. B. Impact of urea and *Azospirillum brasilense* on soybean nodulation and early growth. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 41, n. 11, 2025. DOI: 10.1007/s11274-025-04646-7

SUGIMOTO, M.; HANE, S.; TOGAMORI, Y. Possibility of Increasing Lower Internode Length by Raising Seedlings to Improve Mechanical Harvesting Adaptability in Black Soybean 'Tambaguro' for Edamame (Green Soybean) **Crop Science Society of Japan**, v. 93, n. 3, p. 217-222, 2024. DOI: 10.1626/jcs.93.217.

SUSS, A. D. **Características biométricas, produtivas e fisiológicas da soja submetida a inoculação e co-inoculação com *Bradyrhizobium japonicum* e *Azospirillum brasilense***. 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Marechal Cândido Rondon – Paraná, 2020.

SYROMIATNYKOV, Y. Sustainable soybean cultivation using nitrogen-fixing bacteria and humic products derived from agricultural waste: A review. **Asian Journal of Water, Environment and Pollution**, v. 22, n. 6, p. 1-20, 2025. DOI:10.36922/AJWEP025230190

SYROMYATNIKOV, YU.; KUTS, O.; YAKOVLIEVA, A.; SEMENTSOV, V.; SYROMYATNIKOV, P.; KUTS, O.; SEMENTSOV, V. Elements of sustainable organic soybean cultivation technology without the use of synthetic fertilizers and pesticides. **Agrobioloy**, n. 1, p. 162–170, 2025, DOI: 10.33245/2310-9270-2025-195-1-162-170

SZOSTEK, M; SZPUNAR-KROK, E.; PAWLAK, R.; STANEK-TARKOWSKA, J.; ILEK, A. Effect of different tillage systems on soil organic carbon and enzymatic activity. **Agronomy**, v.12, n. 1, pp. 1-16, 2022, DOI:10.3390/agronomy12010208

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2008. 820 p.

TANYA, P.; TAKÁCS, T.; CSERESNYÉS, I.; KOVÁCS, R.; PARÁDI, I.; KELEMEN, B.; SZILI-KOVÁCS.; SRINIVES, P.; TOOJINDA, T.; VANAVICHIT, A.; NUNTAKIJ, A.; KOTEPONG, S.; LEE, S. Evaluation of N₂ fixation traits in Thai and Korean soybean cultivars. **ScienceAsia**, v. 32, n. 1, p. 93-98, 2006. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2006.32.093

THAPAR, A.; TUAN, P. A.; KAUR, A.; SHARMA, D.; AYELE, B.T. Cytokinin Levels in Regulating Elongation of Basal Internodes and Lowest Pod Height in Soybean. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 44, v. 9, p. 5575-5592. DOI: 10.1007/s00344-025-11781-w

TIMM, C. M.; CARTER, K. R.; CARRELL, A. A.; JUN, S.; JAWDY, S. S.; VÉLEZ, J. M.; GUNTER, L. E.; YANG, Z.; NOOKAEW, I.; ENGLE, N. L.; LU, T. S.; SCHADT, C. W.; 31 TSCHAPLINSKI, T. J. Abiotic Stresses Shift Belowground Populus-associated bacteria toward a core stress microbiome. **Systems**, v. 3, p. 1–17, 2018.

TONIATO, G. S.; AGUILAR, Á. A. B.; MONTEIRO, P. H. R.; RIVADAVEA, W. R.; DE LIMA, J. D.; ALBERTON, O.; DA SILVA, G. J. Co-Inoculation by Spraying on Soybean (*Glycine max* L.) Under Vegetative Phase. **Journal of Animal Science**, n. 8, n. 3, p. 693–703, 2020. DOI: 10.5296/JAS.V8I3.16824

VICENT, B.; HANNIBAL, L.; GALIANA, A.; DUCOUSSO, M. JOURAND, P. Respective and combined roles of rhizobia and ectomycorrhizal fungi in the plant growth, symbiotic efficiency, nutrients and metals contents of a leguminous tree species growing on ultramafic soils. **Symbiosis**, v. 87, n. 2, p. 77-91, 2022. DOI: 10.1007/s13199-022-00850-3

VOROBAY, N. A., et al. Relation of soybean productivity to the functioning of the symbiotic and photosynthetic apparatuses. **Studia Biologica**, v. 18, n. 4, p. 93-108, 2024. DOI: 10.30970/sbi.1804.796

WEI, W. et al. Long-term fertilization coupled with rhizobium inoculation promotes soybean yield and alters soil bacterial community composition. **Frontiers in Microbiology**, v. 14, p. 1161983, 2023. DOI:10.3389/fmicb.2023.1161983

YANG, J.; LIU, C. W.; LI, X.; TIAN, C.; XIE, F.; CAO, Y.; WANG, E. Advances in the legume–rhizobia symbiosis. Zhiwu Shengli Xuebao. **Plant Physiology Journal**, v. 59, n. 8, p. 1407-1435, 2023. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.600005

YILDIRIM, A.; ILKER, E.; EKREN, S. PATH COEFFICIENT AND CORRELATION ANALYSIS IN SECOND CROP SOYBEAN [*Glycine max* (L.) Merrill]. **Society of Field Crops Science**, v.28, n. 2, p. 262-268, 2023. DOI: 10.17557/tjfc.1363214

ZEFFA, D. M.; FANTIN, L. H.; KOLTUN, A.; DE OLIVEIRA, A. L. M.; NUNES, M. P. B. A.; CANTERI, M. G.; GONÇALVES, L. S. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on co-inoculation with *Bradyrhizobium* in soybean crop: A meta-analysis of studies from 1987 to 2018. **Plant Biology**, v. 8, n. e7905, 2020. DOI: 10.7717/peerj.7905

ZHANG, K., et al. No-till and nitrogen management improve soybean yield by increasing the net photosynthetic rate in an arid area of northwest China. **Frontiers in Agronomy**, v. 7, 2025 DOI: 10.3389/fagro.2025.1668004

8 CONCLUSÃO

O presente estudo confirma que o manejo biológico via coinoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense* e a inoculação adicional com *B. elkanii* no estágio R1 da soja é uma estratégia eficaz para a sustentabilidade do SPD.

Não foi observado efeito antagônico severo da coinoculação de *Bradyrhizobium elkanii* e *Azospirillum brasilense* via sementes que inviabilizasse a produtividade das culturas.

Quanto à qualidade do solo, o manejo biológico das BPCP promoveu salto na saúde biológica e química, portanto, os inoculantes mantiveram a integridade da matriz do solo, mostrando ser uma tecnologia segura.

Na produção de matéria seca e palhada do consórcio sorgo grânífero e capins do gênero *Urochloa* posteriores à soja, a inoculação das bactérias promoveu efeitos benéficos, com incrementos na biomassa do sorgo e da forragem, garantindo maior aporte de palhada para o sistema.

O manejo biológico foi determinante para a eficiência fotossintética da soja, permitindo a manutenção do rendimento frente às variações climáticas e altas temperaturas registradas no período experimental.