

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

NELSON CÂMARA DE SOUZA JÚNIOR

**PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DA PRESENÇA OU
AUSÊNCIA DE MAGNÉSIO FOLIAR E RIZOBACTÉRIAS
PROMOTORAS DE CRESCIMENTO PARA MITIGAÇÃO DO
ESTRESSE TÉRMICO EM CONDIÇÕES DE CAMPO**

Ilha Solteira - SP

2025

NELSON CÂMARA DE SOUZA JÚNIOR

**PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DA PRESENÇA OU AUSÊNCIA DE
MAGNÉSIO FOLIAR E RIZOBACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO
PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO EM CONDIÇÕES DE CAMPO**

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

Área de Concentração: Sistemas de Produção

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Andreotti

Coorientadora: Prof. Dr^a. Liliane Santos de Camargos

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729p Souza Júnior, Nelson Câmara de.
Produtividade da soja em função da presença ou ausência de magnésio foliar e rizobactérias promotoras de crescimento para mitigação do estresse térmico em condições de campo / Nelson Câmara de Souza Júnior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
62 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2025

Orientador: Marcelo Andreotti
Co-orientador: Liliane Santos de Camargos
Inclui bibliografia

1. *Bacillus subtilis*. 2. *Bacillus megaterium*. 3. Fisiologia vegetal. 4. *Glycine max* L. 5. Refinamento da produção.


Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa pode auxiliar diretamente na segurança alimentar, visto que as mudanças climáticas são iminentes e representam constantes perdas produtivas, os ganhos constatados podem vir a ser destaque para o refinamento da produção agrícola.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research can directly contribute to food security, as climate change is imminent and represents constant production losses. The observed gains could become a highlight for refining agricultural production.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DA PRESENÇA OU AUSÊNCIA DE MAGNÉSIO FOLIAR E RIZOBACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO PARA MITIGAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

AUTOR: NELSON CAMARA DE SOUZA JUNIOR

ORIENTADOR: MARCELO ANDREOTTI

COORDINADORA: LILIANE SANTOS DE CAMARGOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
MARCELO ANDREOTTI
Data: 04/02/2025 16:56:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

 Documento assinado digitalmente
VANDEIR FRANCISCO GUIMARÃES
Data: 05/02/2025 16:35:03-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. VANDEIR FRANCISCO GUIMARÃES (Participação Virtual)
Centro de Ciências Agrárias / Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE

 Documento assinado digitalmente
MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO
Data: 06/02/2025 11:41:06-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Ilha Solteira, 04 de fevereiro de 2025

Dedico este trabalho à minha mãe Raquel Santos, que sempre acreditou nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que me ajuda em todos os momentos e me dá forças para continuar lutando e perseverando para conquistar as coisas que almejo.

Agradeço a UNESP (Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira), e todos os funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa (FEPE) pelo carinho e empenho para condução desse projeto de pesquisa.

Aos amigos do grupo de pesquisa Equipe Andreotti, pelo empenho e dedicação em auxiliar em todas as etapas de condução desse experimento. Sem sua ajuda constante, esse trabalho não poderia ser realizado.

Agradeço a minha amiga Vitória Almeida Moreira Girardi pelo auxílio e empenho constante para auxiliar na condução desse projeto, o qual sem sua ajuda não se realizaria. Minha eterna gratidão por fazer parte do meu sonho.

Meu carinho e minha gratidão ao meu orientador e amigo Marcelo Andreotti. Sou grato pela ideia do projeto e possibilidade de condução do mesmo. Obrigado por confiar em mim, por ser um pilar para realização desse experimento e pela confiança depositada em todas as atividades.

A minha coorientadora Liliane Santos de Camargos e todos os alunos do Laboratório de Morfofisiologia os quais contribuíram grandemente para realização dessa pesquisa.

Minha eterna gratidão a minha mãe Raquel Santos (*in memoriam*), que sempre me incentivou a realizar esse sonho. Ela me fez lembrar que a vida é feita de sonhos, os quais as vezes demoram a se realizar, mas que com coragem e um pouco de fé podem ser sempre reais. Essa conquista é dela e sempre será para ela.

Esse projeto de pesquisa foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), com número de concessão 88887.904424/2023-00.

“Se podemos sonhar, também podemos tornar nossos
sonhos realidade”. Tom Fitzgerald

RESUMO

As bactérias promotoras de crescimento de plantas, aliadas a nutrição mineral adequada têm se mostrado essenciais para aumentar a produtividade agrícola. Com as mudanças climáticas, as plantas enfrentam estresses, o que prejudica a produção. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da inoculação de rizobactérias, bem como aplicação de magnésio via foliar, como bioestimulante fisiológico e seus efeitos na produtividade de grãos de soja. A pesquisa foi conduzida em campo, em solo de cerrado sob sistema plantio direto, que tem o histórico de combinar técnicas de manutenção de palhada no solo e rotação de culturas por treze anos. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3x2, onde foram avaliados três tratamentos com bactérias (*Bradyrhizobium japonicum* nas sementes (controle), combinação de *B. japonicum* nas sementes + *Bacillus subtilis* + *Bacillus megaterium* no sulco; *B. japonicum* nas sementes + *B. subtilis* + *B. megaterium* nas sementes), com presença ou ausência de magnésio via foliar, tendo como fonte o sulfato de magnésio na dose padrão de 8 kg ha⁻¹, em estágio V₆ da soja. Os resultados comprovaram que a aplicação de magnésio foi capaz de auxiliar na fisiologia fotossintética de modo geral, além de proporcionar aumentos na produção de grãos. A interação com a coinoculação via sementes foi capaz de aumentar a fotossíntese e eficiência instantânea do uso da água, além de número de grãos e de vagens por planta. Pela análise dos componentes principais (PCA), foi constatado que aliar a coinoculação via sementes e a aplicação de Mg via foliar pode melhorar a fisiologia fotossintética e reduzir indicadores de estresse na soja.

PALAVRAS-CHAVE: *Bacillus subtilis*; *Bacillus megaterium*; fisiologia vegetal; *Glycine max* L.; refinamento da produção.

ABSTRACT

Plant growth-promoting bacteria, combined with proper mineral nutrition, have proven essential in increasing agricultural productivity. With climate change, plants face stresses that hinder production. The present study aimed to evaluate the effect of rhizobacteria inoculation, as well as foliar magnesium application as a physiological biostimulant, and their effects on soybean grain productivity. The research was conducted in the field on cerrado soil under a no-till system, which has a history of combining techniques for maintaining crop residue in the soil and crop rotation for thirteen years. The experimental design adopted was a randomized block design, in a 3x2 factorial scheme, where three treatments with bacteria were evaluated (*Bradyrhizobium japonicum* on seeds (control), a combination of *B. japonicum* on seeds + *Bacillus subtilis* + *Bacillus megaterium* in the furrow; *B. japonicum* on seeds + *B. subtilis* + *B. megaterium* on seeds), with the presence or absence of foliar magnesium application, using magnesium sulfate at the standard dose of 8 kg ha⁻¹ at the V₆ stage of soybean. The results showed that magnesium application helped overall photosynthetic physiology, as well as providing increases in grain production. The interaction with co-inoculation via seeds was able to increase photosynthesis and instantaneous water use efficiency, in addition to the number of grains and pods per plant. Principal component analysis (PCA) revealed that combining seed co-inoculation with foliar Mg application could improve photosynthetic physiology and reduce stress indicators in soybeans.

KEYWORDS: *Bacillus subtilis*; *Bacillus megaterium*; plant physiology; *Glycine max* L., production refinement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área experimental no município de Selvíria - MS, Brasil	29
Figura 2 – Dados meteorológicos de temperatura máxima, mínima e precipitação pluvial, no município de Selvíria – MS, Brasil, 2023/24, durante o período de condução do experimento	30
Figura 3 – Instalação, aplicação e avaliações na cultura da Soja no município de Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24.....	32
Figura 4 – Desdobramento para variáveis Taxa fotossintética (A), Carbono interno (CI) e Eficiência instantânea do uso da água (EIUA) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, Selvíria-MS, Brasil, safra 2023/24. Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas dentro de inoculação/coinoculação e minúsculas dentro de aplicação do Mg não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).	41
Figura 5 – Desdobramento para variável Número de vagens por planta (NVP) Número de grãos por planta (NGP) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24. Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas dentro de inoculação/coinoculação e minúsculas dentro de aplicação do Mg não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).....	44
Figura 6 – Análise de componentes principais (PCA) em função da aplicação ou não de magnésio sob os parâmetros fisiológicos e produtivos da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, no município de Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24	46
Figura 7 – Análise de componentes principais (PCA) em função da inoculação ou coinoculação de rizobactérias sob os parâmetros fisiológicos e produtivos da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, no município de Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização química do solo na camada de 0-0,20 em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24	31
Tabela 2 – Análise de variância para as variáveis clorofila a, clorofila b, clorofilas totais, carotenoides e feofitina na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24	37
Tabela 3 – Análise de variância para as variáveis ureídeos, malondialdeído (MDA), proteína, peróxido, aminoácidos (AA) e índice relativo de clorofila (SPAD) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24	38
Tabela 4 – Análise de variância para as variáveis Taxa fotossintética (A), Transpiração (E), Condutância estomática (GS), Carbono interno (CI) e Eficiência instantânea do uso da água (EIUA) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS	40
Tabela 5 – Análise de variância para as variáveis Altura de planta (AltP), Altura de inserção da primeira vagem (AIPV), População de plantas (Pop), Número de vagens por planta (NVP), Número de grãos por vagem (NGP), Massa de 100 grãos (M100) e Produtividade de grãos (Prod), para cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24.....	42
Tabela 6 – Dados de correlação para análise de componentes principais (PCA) na cultura da soja sob presença ou ausência da pulverização de magnésio foliar e rizobactérias promotoras de crescimento, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estágios de desenvolvimento vegetativo da cultura da soja.....	19
Quadro 2 – Estágios de desenvolvimento reprodutivo da soja.....	19

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Taxa fotossintética

AIPV - Altura de inserção da primeira vagem

Al - Alumínio.

AltP - Altura de planta

CI - Carbono interno

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.

E - Transpiração

EIUA - Eficiência instantânea do uso da água

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EROs - Espécies reativas de oxigênio

FBN - Fixação biológica de nitrogênio

GS - Condutância estomática

I - Inoculação

MDA - Malondialdeído

M100 - Massa de cem grãos

NGP - Número de grãos por planta

NVP - Número de vagens por planta

O - Oxigênio

P - Pulverização

Pig - Pigmentos fotossintetizantes (SPAD)

Perox - Peróxido de hidrogênio

POP - População de plantas.

PROD - Produtividade de grãos

Prot - Proteínas

RBPCP - Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas.

Rubisco - Ribulose 1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase.

SPD - Sistema plantio direto

URED - Ureídeos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Cultura da Soja	17
2.2	Magnésio	20
2.3	Estresses abióticos e mudanças climáticas.....	23
2.4	Espécies reativas de oxigênio	24
2.5	Bactérias promotoras de crescimento de plantas e fixadoras de nitrogênio	25
3	OBJETIVOS.....	28
3.1	Objetivo Geral.....	28
3.2	Objetivos Específicos	28
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	29
4.1	Características da área e do local.....	29
4.2	Instalação e Condução do Experimento	31
4.3	Avaliações fisiológicas.....	33
4.3.1	Avaliação de trocas gasosas.....	33
4.3.2	Pigmentos fotossintetizantes	33
4.3.3	Caracterização do metabolismo de nitrogênio e mecanismo de tolerância ao estresse	33
4.4	Avaliações dos componentes da produção e produtividade da soja	35
4.5	Análise estatística	36
5	RESULTADOS.....	37
6	DISCUSSÃO	48
7	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

O magnésio (Mg) desempenha importante papel em processos fisiológicos das plantas, visto que é o íon central da molécula de clorofila. Além disso, desempenha importância na síntese de enzimas como a Ribulose 1,5-Bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) e Fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase), enzimas vitais para o processo fotossintético, além de atuar como elemento essencial para a produção de trifosfato de adenosina (ATP) (Taiz *et al.*, 2017). Todas essas funções tornam a adubação com Mg essencial para garantir produtividade em plantas de metabolismo C₃ e C₄. Estudos com aplicações foliares de Mg, em fases onde a eficiência de absorção radicular passa a diminuir, tem indicado que a aplicação do nutriente é capaz de proporcionar ganhos em produtividade, pelo fato de melhoria do aparato fotossintético das plantas (Wang *et al.*, 2020). Como o Mg auxilia em processos fotossintéticos vitais, colaborando para que a Rubisco atue como carboxilase, e pelo fato de que cerca de 85% das espécies do planeta serem plantas de metabolismo C₃, altamente propensas a perdas por estresses (Taiz *et al.*, 2017), além do aumento considerável da temperatura anual, o que aumenta a temperatura foliar, favorecendo a fotorrespiração e afetando a relação CO₂/O₂, as pesquisas com o nutriente são indispensáveis em projetos de inovação científica que visam refinar a produção agrícola e auxiliar a planta em parâmetros fisiológicos.

Mesmo em sistema plantio direto (SPD) consolidado por anos, resultados mostram que culturas como soja e milho, quando receberam aplicações foliares de Mg, apresentaram algo similar a um “efeito de indução de resistência ou efeito vacina”, onde parâmetros fotossintéticos foram afetados positivamente, o que acarretou para culturas ganhos consideráveis em produtividade (Altarugio *et al.*, 2017; Branquinho, 2020; Rodrigues *et al.*, 2021). Com a crescente demanda mundial por alimentos, atrelado às mudanças climáticas, técnicas que proporcionem ganhos de produção ganham cada vez mais destaque e merecem foco em pesquisa científica mundial.

As ondas de calor e secas severas tem afetado o potencial produtivo das culturas, o qual só poderá ser atingido se todas as condições necessárias (água, luz, temperatura, nutrição) para desenvolvimento vegetal forem satisfatórias. Pesquisas que visem auxiliar na mitigação de estresses abióticos nas culturas são fundamentais, visto que estes podem afetar negativamente a segurança alimentar. Déficits hídricos e temperaturas extremas, são fatores climáticos incontrolláveis presentes na vida de produtores rurais. Temperaturas altas provocam danos diretos nas plantas, ocasionando aquecimento de tecidos, podendo causar também efeitos indiretos como o déficit hídrico, o que pode reduzir a turgescência das células. Além disso,

plantas sob estresse térmico podem ter sua expressão gênica diretamente afetada, pois a planta tende a preservar suas reservas para completar seu ciclo de vida, o que reduz diretamente a produção. O aumento da fotorrespiração, além da produção de compostos EROs (espécies reativas de oxigênio), também são vitais para diminuir a produção, com danos na produção de proteínas e redução direta no metabolismo fotossintético, que aparecem como resultado ao estresse térmico (Pretty; Bharucha 2014; Taiz *et al.*, 2017; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

A resposta da planta para qualquer tipo de estresse irá variar de espécie para espécie, porém à medida que a planta percebe qualquer efeito estressante, ela produz uma resposta metabólica conhecida como “espécies reativas de oxigênio” ou “EROs”. Essas moléculas servem para planta como uma espécie de sinalizador, indicando que algo de errado está acontecendo, com reflexo direto na diminuição do metabolismo, afetando a produção de compostos essenciais como proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos (Taiz *et al.*, 2017). Sendo assim, quanto aos estresses abióticos, o reflexo principal na planta é a diminuição do seu metabolismo, fechamento estomático, enrolamento das folhas, menores taxas fotossintéticas, desenvolvimento de cutícula e tricomas na superfície foliar, para minimizar perdas de água, com o objetivo principal de terminar seu ciclo de vida (Taiz *et al.*, 2017; Broetto *et al.*, 2017). Sendo assim, estratégias que visem afetar diretamente o metabolismo fotossintético dessas plantas tornam-se indispensáveis, visto o constante aumento de fatores estressantes, resultado das mudanças climáticas globais. Toma-se como destaque as ondas de calor extremas, que fizeram a temperatura média do planeta aumentar cerca de 1,45°C no ano de 2023 (Organização das Nações Unidas, 2024).

Para auxiliar na mitigação desses estresses abióticos iminentes, outro aliado comum utilizado na agricultura são as rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RBPCP), que auxiliam no crescimento de raízes, melhorando a exploração do solo, beneficiando a absorção de água e nutrientes (Poudel *et al.*, 2021; Armanhi *et al.*, 2021). Em soja, o gênero *Bradyrhizobium* é comumente difundido, pelo papel preponderante na fixação biológica de nitrogênio (FBN), o que aumenta consideravelmente parâmetros de produção da cultura, e faz a soja brasileira ser altamente produtiva, sem necessidade do uso do adubo nitrogenado (Hungria *et al.*, 2001; Hungria; Nogueira 2020).

As bactérias do gênero *Bacillus* também se destacam como RBPCP, comumente empregadas em práticas de coinoculação (misturas de diferentes espécies e gêneros de bactérias), auxiliando na defesa de plantas contra estresses bióticos, como no ataque de patógenos e de pragas, e abióticos como tolerância à déficits hídricos, sendo que essas também

atuam no crescimento das plantas e absorção de nutrientes, síntese de fitormônios, produção de sideróforos e melhorias nas condições microbiológicas e na fertilidade do solo, auxiliando na solubilização de nutrientes (Kumar *et al.*, 2009; Taha *et al.* 2016; Ribeiro *et al.* 2016; Duca; Glick, 2020). Em estudos com a combinação de espécies do gênero *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis*, tem sido observado ganhos em produtividade nas culturas, explicados pela maior solubilização de fósforo não lábil pelas bactérias e pelo sistema radicular bem desenvolvido, capaz de aumentar a quantidade de pelos radiculares, o que incrementa na absorção de água e nutrientes (Gupta *et al.*, 2015; Furmam *et al.*, 2019).

A soja é uma das culturas agrônômicas de maior destaque no Brasil e no mundo, e, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a estimativa de produção da safra brasileira de soja em 2023/24 chegou a 147,35 milhões de toneladas, um decréscimo de aproximadamente 7 milhões de toneladas, reflexo dos estresses abióticos, principalmente déficit hídrico, em ocasião da falta de chuvas, e ondas de calor em meados de novembro a fevereiro, durante o período de produção. O Brasil é hoje o maior produtor mundial de soja, segundo o relatório da CONAB, e a cultura é uma das mais propensas a efeitos de estresses, justamente por ser uma planta de metabolismo C₃, altamente influenciada pelo fotoperíodo, ou seja, pela duração dos períodos sob luz (Taiz *et al.*, 2017).

Portanto, pela sua importância na agricultura mundial, estratégias que visem aumentar a produção de maneira sustentável, são indispensáveis para garantir a segurança alimentar mundial, além de que são bem-vistas pelo mercado consumidor e por produtores. O Mg, aliado à coinoculação de rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RBPCP), pode contribuir para a melhoria do metabolismo fotossintético da soja, resultando em benefícios, mesmo em solos com fertilidade corrigida. Essa otimização fotossintética favorece a planta, permitindo que, mesmo diante de estresses abióticos, como as oscilações térmicas, haja impacto positivo em ganhos produtivos da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura da Soja

Atualmente, as principais cultivares comerciais de soja apresentam um caule espesso, que é pouco ramificado. Sua raiz possui um eixo principal, com raízes laterais bastante ramificadas. A planta é uma leguminosa oleaginosa, que forma vagens e possui flor autógama de coloração roxa. Suas vagens possuem de 1 a 3 sementes, variando de 5 a 11 mm e pesando cerca de 120 a 180 mg por semente. A altura das plantas varia de 60 a 110 cm de comprimento e é uma cultura altamente influenciada pelo ambiente. A soja pode ser considerada uma planta de dias curtos. Seus grãos são altamente ricos em óleos e proteínas, por isso há um interesse grande em sua produção em caráter mundial (Larcher, 2006; Mundo Ecologia, 2019; Silva, 2023).

A planta é de metabolismo C_3 , o que indica que a espécie é altamente susceptível à altas temperaturas, pois a enzima que catalisa a conversão do CO_2 (Ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase, ou, RUBISCO) em carboidratos, pode agir como oxigenase (alta afinidade com o O_2), em condições de estresse, o que afeta os parâmetros fotossintéticos e consequentemente diminui a produção. A soja é uma espécie fotossensível de dia curto (necessita de um mínimo de horas no escuro para que possa florescer), sendo induzida ao florescimento quando os valores de fotoperíodo no ambiente de produção passam a ser inferiores ao valor do fotoperíodo crítico da cultivar. Em geral, para manter suas taxas fotossintéticas adequadas para o desenvolvimento, pesquisadores afirmam que a soja suporte até aproximadamente $30^\circ C$, sendo que a temperatura de $27^\circ C$ é ideal para fotossíntese e assimilação de nutrientes, e temperaturas entre 20 e $22^\circ C$, são ideais na fase reprodutiva, sendo altamente prejudicada pela concentração de Al no solo (Cakmak, Horst, 1991; Larcher, 2006; Taiz *et al.*, 2017).

A soja apresenta grande interesse comercial em caráter humano e animal, sendo que além da produção de óleo de cozinha, o grão pode ser usado para produção de leite de soja, tofu, proteína de soja - no caso da alimentação humana e biocombustíveis. Para produção animal, o coproduto da produção de soja, denominado de bolo ou torta (uma espécie de resíduo que é obtido após a extração do óleo e da água da semente), serve para produção de rações animais, por conta de sua alta concentração de proteínas. Além disso, a produção de biodiesel, como um coproduto da produção de soja, tem comumente sido desenvolvida ao redor do mundo (Mundo Ecologia, 2019; Nepomuceno *et al.*, 2021; Santos; Debiasi, 2021).

Por sua alta importância quanto cultura, a soja tem sido cada vez mais explorada e cultivada no país. Segundo informações do Canal Rural (2019) e da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), a soja é a principal cultura do país, sendo grande responsável pela balança comercial - o que atrai o interesse de produtores, pois a rentabilidade da cultura e sua produção é altamente significativa. Segundo os órgãos, há 26 anos, desde que o Brasil possui dados mais confiáveis de suas exportações, a cultura da soja vem liderando o saldo da balança comercial. A CONAB reporta que, a área de soja no país passou de 11,3 milhões de hectares, para pouco mais de 43,5 milhões em 2021. Com uma produção média de 58,7 sacas por hectare, o que gera uma produção anual de aproximadamente 150 milhões de toneladas de soja. Em 2024, os dados observados foram diferentes, pois a produção de soja nacional chegou a 147,3 milhões de toneladas. Vale destacar que, esse número representou uma redução de 7,2 milhões de toneladas em relação à safra anterior em produção total, o que acarretou uma produção média de 53,4 sacas ha⁻¹ (CONAB, 2024). Pesquisadores destacam que essa queda é um reflexo iminente das mudanças climáticas que causam estresses consideráveis nas plantas.

O Brasil exerce protagonismo quando o assunto é exportação, pois cerca de 101 milhões de toneladas na safra 2022/23 e pouco mais de 92 milhões de toneladas na safra 2023/24 de grãos foram exportadas do país (CONAB, 2024). Segundo as pesquisas científicas realizadas pela EMBRAPA, o país tem se destacado ainda mais no cenário mundial, e a utilização de novas técnicas e pesquisas altamente rigorosas para aumento de produtividade da cultura, são de extrema importância para que o Brasil se coloque no atual patamar em que se encontra, principalmente com técnicas que visem auxiliar na mitigação de estresses, que acarretam perdas consideráveis para a cultura (Hirakur; Lazzarotto, 2014; Silva, 2023).

A pesquisa científica tem sido um aliado na produção de soja no país, e inúmeros pesquisadores afirmam que o aumento de produtividade da soja só se dá por novas técnicas de manejo. Isso faz com que a cultura seja uma das mais tecnificadas no mundo. Novas técnicas de manejo e conservação do solo, aplicação de rizobactérias, melhoramento genético e conhecimento de manejo e tratamentos culturais, tem sido destaque na pesquisa para que a soja venha a ocupar tal patamar (Tavares, 2021).

A fenologia da cultura subdivide-se em duas grandes fases: a primeira vegetativa (dividida em pelo menos cinco estádios, a qual será responsável por iniciar a emergência da plântula, formar a primeira folha trifoliada, encerrando a fase com a formação da última folha trifoliada), e a fase reprodutiva (dividida em pelo menos oito estádios, a qual é responsável pela formação de flores, vagens e grãos). A duração desses estádios fenológicos da cultura, vai variar

de acordo com condições ambientais e também com a cultivar escolhida. De forma geral, o ciclo da soja, pode variar de 90 até 150 dias, sendo que os principais fatores que afetam essa relação serão a latitude, o fotoperíodo e a temperatura (acúmulo de graus dia). O manejo integrado de pragas (MIP), práticas de monitoramento em campo, adequadas práticas de cultivo, como rotação de culturas e plantio direto, e uso de irrigação, podem afetar os estágios de desenvolvimento da cultura. Nesse caso, boas práticas e bom uso de tecnologias são essenciais para atingir altas produtividades (Silva, 2023).

Nos quadros 1 e 2 são apresentados os estádios fenológicos que descrevem melhor o desenvolvimento da cultura da soja.

Quadro 1 – Estágios de desenvolvimento vegetativo da cultura da soja

Fases:	Identificação:
V _E	Emergência da plântula, onde os cotilédones ficam acima do solo.
V _C	Fase cotiledonar, destacada pelo desenvolvimento dos cotilédones e folhas unifoliadas que não se tocam mais.
V ₁	Formação da primeira folha trifoliada.
V ₂	Formação da segunda folha trifoliada.
V _{3...V_n}	Formação da terceira folha trifoliada, até a formação da última folha trifoliada antes do florescimento.

Fonte: Adaptado de Trentin *et al.* (2013); Silva (2023).

Quadro 2 – Estágios de desenvolvimento reprodutivo da soja

Fases:	Identificação:
R ₁	Início do florescimento, onde encontra-se ao menos uma flor aberta.
R ₂	Florescimento pleno, onde há uma flor aberta na parte superior da planta.
R ₃	Início do enchimento das vagens.
R ₄	Enchimento pleno das vagens.
R ₅	Início do enchimento dos grãos.
R ₆	Enchimento pleno dos grãos. Nessa fase, a planta irá atingir o peso máximo dos grãos e inicia-se o processo de senescência foliar.
R ₇	Início da maturação.
R ₈	Maturação plena, onde 95% das vagens estão maduras.

Fonte: Adaptado de Trentin *et al.* (2013); Silva (2023).

É notório que em relação a fenologia da cultura, Trentin *et al.* (2013), ainda subdividem as cultivares em 13 estágios de maturação, os quais são: 000, 00, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10, onde os cultivares 000, 00, 0; são mais adaptadas as condições frias. Trabalhos da EMBRAPA Soja (2021) e Silva (2023), ainda classificam a soja quanto a sua maturação como super-precoce, precoce, normal e tardia, e avaliam que para melhor desenvolvimento da cultura, é necessário que a época de semeadura, adoção do sistema plantio direto, manejo do solo, práticas de adubação, investimento em tecnologia e semeadura adequada, devem ser observados para escolha de uma cultivar adequada para cada local.

2.2 Magnésio

O magnésio (Mg) é um macronutriente de plantas associado a diversas funções vitais do desenvolvimento. O íon Mg^{2+} está ligado em atividades fisiológicas como a fotossíntese, pois é constituinte da molécula de clorofila, sendo seu átomo central. Além disso, este macronutriente atua como ativador enzimático, sendo o nutriente mineral que mais ativa enzimas na planta. Outras importantes funções do Mg na planta são observadas no auxílio do metabolismo do nitrogênio, e também contribui para a síntese de proteínas e aminoácidos e sinergismo na absorção de fósforo. Como os solos brasileiros são altamente ácidos e intemperizados, há baixa disponibilidade de nutrientes, o que explica os baixos teores de magnésio em solos tropicais e que pode implicar em uma baixa produtividade. Nesse caso, práticas agrícolas que visem aumentar e manter altos teores de nutrientes no solo ou na planta são indispensáveis para que se possa ter uma maior produtividade (Raij *et al.*, 2001; Malavolta, 2006). Hoje, a prática da calagem em solos tropicais, além de ser usual para correção da acidez dos solos é vital para o fornecimento de Mg para planta (Malavolta, 2006).

O principal papel do Mg na planta tem a ver com a formação da molécula de clorofila. Em geral, pesquisas descrevem que a clorofila precisa de 15 a 20% do teor total de magnésio na planta para que possa otimizar a absorção de luz e transferir energia para os centros de reação da fotossíntese. Pode-se afirmar que, sem o magnésio as plantas teriam dificuldades para produzir energia (ATP) e assim crescer de maneira adequada. O nutriente também pode auxiliar no crescimento e melhor desenvolvimento das raízes de plantas, o que resulta incremento de absorção de água e nutrientes, fazendo com que a planta se torne mais vigorosa. Trabalhos com utilização de magnésio também têm comprovado que sua aplicação pode melhorar a qualidade pós colheita de frutos, com incremento do teor de açúcar e qualidade da parede celular (Chen *et al.*, 2018).

O nutriente é considerado como móvel na planta, nesse caso a deficiência irá ocorrer em folhas mais velhas, na forma de clorose internerval. Além de importante na fotossíntese, sua concentração na planta para realização do processo é vital, visto que ele auxilia na ativação de numerosas enzimas, incluindo a ribulose- 1,5- bifosfato carboxilase/oxigenase ou Rubisco, utilizada no Ciclo de Calvin, responsável pelo primeiro grande passo da fotossíntese, a catalização de carbono (Parry *et al.*, 2008).

Estima-se que, em média, 75% do magnésio presente nas folhas esteja envolvido na síntese proteica, o que pode implicar na cadeia produtiva de grãos (White; Broadley, 2009). Além deste fato, o magnésio é considerado um nutriente de alta demanda na dieta humana (encontra-se entre os sete principais), o que implica em sua utilização na biofortificação de alimentos para ajudar muito a nutrição humana. Em geral, as plantas agricultáveis precisam de cerca de 1,5 a 3,5 gramas de magnésio por quilo de matéria seca para crescerem de forma saudável. Um valor considerado baixo, mas que deficiente pode afetar e muito o desenvolvimento e a produção das culturas. A soja, é uma cultura considerada como acumuladora de magnésio, assim o suprimento adequado gira em torno de 40% do teor de nutriente nos grãos, em uma faixa de variação de 31,7 até 57,9%, em base seca (Pipolo *et al.*, 2015).

Avaliando trabalhos na área, é possível observar que o magnésio vem sendo comumente utilizado com o intuito de incrementar a taxa fotossintética das plantas. Tem se observado que a presença de magnésio pode aumentar os teores de clorofila, desde que utilizada dose ótima da fonte do nutriente via solo e/ou foliar. No trabalho de Mógor *et al.* (2013), estudando doses de magnésio via foliar em tomateiro, observou-se que há aumento nos teores de clorofila na cultura em relação às doses de magnésio testadas. O aumento da clorofila pode significar melhor utilização de meios para reações fotossintéticas, o que pode significar em maior produtividade para a cultura.

No trabalho de Tränkner *et al.* (2016), utilizando plantas de cevada deficientes em Mg verificou-se que essas apresentaram aumento do estresse oxidativo, indicando prejuízos no ganho de carbono e redução da produção de biomassa. Isso mostra que trabalhos com utilização de magnésio como nutriente, seja via solo ou foliar, são de extrema importância, visto que sua carência pode significar prejuízos para molécula de clorofila, processo fotossintético, atividade enzimática, o que poderá gerar uma redução da produtividade das culturas.

Estudos com diferentes culturas agrícolas evidenciam que, aplicações foliares de Mg na fase de maturação, em que a atividade radicular vai diminuindo, tem possibilitado ganhos de

produtividade e qualidade dos produtos colhidos. O que se tem observado é que o transporte de carboidratos tem relação direta com o status do elemento na planta, assim como a ativação de enzimas de transporte na membrana que podem estimular o carregamento de sacarose no floema. Outro ponto visto é que o magnésio vem sendo utilizado como atenuador (“vacina”) do estresse luminoso. Este vem a ocorrer quando o excesso de intensidade luminosa, que é absorvido pela planta, supera a capacidade da maquinaria fotossintética de converter luz em açúcares. Assim, também estresse térmico irá afetar o metabolismo vegetal, devido ao seu efeito sobre a estabilidade de proteínas e reações enzimáticas. Portanto, torna-se indispensável sempre considerar a presença do magnésio nos programas de nutrição de culturas, visto o cenário atual de mudanças climáticas e aquecimento global (Cakmak, 2013).

Em trabalho realizado por Cecatto Júnior *et al.* (2021), com aplicação de magnésio foliar em milho, foi observado que além de melhor estruturação visível nas plantas, houve aumento de massa seca de raízes e também massa seca da parte aérea. Segundo os autores, isso possibilitou maior ganho em termos de produtividade, haja vista possibilidade de maior absorção de água, de outros nutrientes e também na interceptação da luz. Trabalhando com a cultura da soja, Deliboran *et al.* (2011), avaliando doses de magnésio juntamente com fósforo constataram que a aplicação de magnésio foliar resultou em incremento de produtividade de 204 kg ha⁻¹ na menor dose, sendo possível atingir incremento de 675 kg ha⁻¹ de grãos na maior dose. Esses autores também observaram que o teor de clorofila na folha foi maior com aumento das doses de magnésio, bem como a massa seca da parte aérea e das raízes.

No trabalho de Rodrigues *et al.* (2021), com soja e milho, e aplicação de magnésio foliar, a aplicação do Mg⁺² resultou em aumento de sua concentração na soja (10,4%) e no milho tanta na primeira, quanto na segunda safra (13,3 e 14,4%, respectivamente). Neste trabalho a aplicação de magnésio fez com que o desempenho de trocas gasosas aumentasse em ambas as culturas, além de aumentar os valores da taxa fotossintética líquida e também da condutância estomática (incrementos de 49 % e 21% para soja e 29% e 47% para o milho). Em suma, plantas que receberam a dose de magnésio foliar foram mais eficientes fotossinteticamente e transformando gás carbônico em esqueletos de carbono (açúcar), assim perdendo menos água durante o processo. O trabalho mostrou que como resultado, tanto a cultura da soja, quanto a do milho, converteram o açúcar produzido pela fotossíntese em maior número de grãos por planta.

O magnésio é absorvido pelas plantas principalmente em sua forma catiônica (Mg⁺²), ocorrendo após o contato direto entre o íon presente na solução do solo e a raiz da planta

(Malavolta, 2006). Outra via de absorção do íon é a foliar, onde o principal adubo utilizado é o sulfato de magnésio. Vale destacar que o magnésio pode ser perdido no solo por lixiviação e/ou erosão, por isso métodos de cultivo sustentáveis, como o SPD, podem auxiliar na disponibilidade do nutriente (Rosolem, 2002).

2.3 Estresses abióticos e mudanças climáticas

O estresse é definido como qualquer fator ou condição ambiental que possa fazer com que a planta não expresse o seu potencial genético. Por exemplo, a falta de água no ciclo das plantas pode prejudicar o crescimento e a produção. Para conseguir passar por essa condição adversa, uma alternativa encontrada pelas plantas é fechar os estômatos para minimizar a perda de água por transpiração, entretanto, reduz a captação de CO₂ para fotossíntese (Taiz *et al.*, 2017).

O potencial genético das plantas apenas poderá ser atingido se todos os fatores ambientais estiverem adequados. Cada vez mais a ocorrência de fenômenos como a seca, ondas de calor, veranicos, radiações ultravioletas têm afetado o rendimento das culturas agrícolas. O principal resultado das mudanças climáticas nas plantas tem sido a elevação na produção de espécies reativas do oxigênio, que em concentrações elevadas pode ocasionar a morte das células e afetar o desenvolvimento normal das plantas. Desse modo, a pesquisa de novas técnicas que visem mitigar o efeito dos estresses em plantas é de grande importância, pois as mudanças climáticas podem ameaçar a segurança alimentar global e mesmo em sistemas conservacionistas do solo, estes fatores podem acarretar perdas consideráveis de produtividade (Chakraborty *et al.*, 2015; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

Seca é um fator climático que pode ser definido como a ausência de água por um longo período, ou ainda podendo afetar as plantas em períodos em que a disponibilidade hídrica é extremamente importante. Como a maioria das plantas possuem na constituição de sua matéria fresca cerca de 85-90% de água, a importância da disponibilidade hídrica no solo é fundamental. Como os veranicos são constantes, principalmente em condições do Cerrado brasileiro, prever hoje uma data adequada para semeadura passa a ser um constante desafio para produtores, visto que com o aquecimento global e as mudanças climáticas, o escalonamento pluvial e climático ao longo do ano não tem sido mais sazonal e previsível (Taiz *et al.*, 2017; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

No campo, a temperatura é outro fenômeno climático incontornável da natureza e o que mais necessita de pesquisas, visto o aquecimento global com ondas de calor é uma realidade para os sistemas de produção agropecuários. O estresse térmico, por conta de altas temperaturas, é definido como aquele que é capaz de causar danos irreparáveis ao crescimento e desenvolvimento de plantas. Em geral, o aumento de temperaturas é capaz de acelerar a taxa do desenvolvimento reprodutivo, fazendo com que a planta reduza seu ciclo, diminuindo a taxa fotossintética e sua contribuição para formação de sementes e frutos, o que irá resultar em menor produtividade. Temperaturas altas provocam danos diretos por conta do aquecimento de tecidos e podem causar efeitos indiretos como o do déficit hídrico, o que pode reduzir a turgescência das células (Pretty e Bharucha, 2014; Taiz *et al.*, 2017). Uma das alternativas importantes para mitigar o efeito de estresse vem sendo a utilização de rizobactérias. A população microbiana é capaz de liberar sinalizadores, como resposta ao efeito de estresses nas plantas, desencadeando reações em diferentes vias, pois sabe-se que a planta é capaz de utilizar esses microrganismos como auxiliares no processo de redução de estresses (Zolla *et al.*, 2013, Singh, 2014; Taiz *et al.*, 2017).

2.4 Espécies reativas de oxigênio

A descoberta do oxigênio atmosférico (O_2) ocorreu por volta dos anos de 1774, pelos pesquisadores Carl Wilhelm Scheele e Joseph Priestley. Apenas em 1778, o famoso pesquisador Antoine Laurent Lavoisier publicou um estudo em que descreveu o mecanismo de oxidação através de experimentos com fogo e mercúrio. Lavoisier entendeu que um gás mantinha a combustão da chama da vela acesa, e que a falta desse gás ocasionava a extinção da chama. Para esse gás, o pesquisador deu o nome de oxigênio (O) e em pesquisas afirmou que cerca de 21% de todo o gás contido na atmosfera é formado por O (Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

Ao longo dos anos, foi constatado que existem formas mais reativas do que o O_2 no seu estado basal. Essas espécies foram denominadas como espécies reativas de oxigênio (EROS), onde se foi constatado que a formação do complexo EROS se inicia a partir de reações de redução do O_2 , através da incorporação de um elétron ao oxigênio molecular. Os complexos EROS podem ser produzidos tanto nas células animais, quanto nas células vegetais, comumente estudadas e de grande importância para pesquisa. Essas EROS podem ser do tipo radicais livres como o radical superóxido (O_2^-) e o radical hidroxila (OH^-), que são espécies que possuem um ou mais elétrons desemparelhados, o que torna essas altamente reativas e instáveis. É importante destacar que também existem EROS que não possuem elétrons desemparelhados, e

que mesmo assim, ainda podem ser bastante reativas, como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ou as moléculas de oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$), que também podem ser reativas (Taiz *et al.*, 2017; Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

Por serem altamente reativas às estruturas e complexos da planta, a formação das EROS pode desencadear respostas que podem afetar diferentes estruturas das células por reações de oxidação com diversas moléculas (lipídios, carboidratos, proteínas e ácidos nucleicos), ou seja, pela remoção de elétrons destas substâncias. Vale ressaltar que esses complexos EROS são produzidos em diferentes locais das estruturas da planta, como os cloroplastos, mitocôndrias, membrana plasmática, peroxissomo, parede celular, entre outras. As EROS são sintetizadas tanto em condições normais, como em estresse, porém em estresse, sua produção é contínua, agindo como sinalizador (Taiz *et al.*, 2017; Mehla *et al.*, 2017).

Por serem compostos altamente reativos, as moléculas podem levar à oxidação de componentes celulares importantíssimos para a planta, como a membrana celular, lipídeos, proteínas e até mesmo o material genético. Dessa forma, a literatura moderna define as EROS como moléculas sinalizadoras de grande importância, sendo que sua presença e concentração na célula pode indicar que a planta está passando por algum tipo de estresse, seja ele biótico ou abiótico. Toda a planta, ao passar por períodos de estresse e produção dos compostos, tende a diminuir suas taxas metabólicas e consequentemente plantas de importância agrícola tendem a diminuir a produção. Fatores comuns que acontecem em plantas sob estresse são: fechamento estomático, gravitropismo radicular, tolerância à deficiência de oxigênio, fortalecimento da parede celular, senescência, produção de fitoalexinas, fotossíntese, abertura estomática e no controle do ciclo celular (Taiz *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2019).

Para minimizar a ação das EROS, as plantas desenvolveram mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos. O mecanismo antioxidante enzimático é composto pela superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT) e glutatona redutase (GR) dentre outras, enquanto ácido ascórbico glutatona, ácidos fenólicos, alcalóides, flavonóides e α tocoferol dentre outras, são antioxidantes não-enzimáticos. A produção desses mecanismos auxilia a planta em altas concentrações dos compostos EROS (Hasanuzzaman *et al.*, 2020).

2.5 Bactérias promotoras de crescimento de plantas e fixadoras de nitrogênio

Nos últimos anos, a utilização de novas técnicas que visam aumentar a produção de maneira sustentável tem sido difundida e pesquisada. Dentre essas técnicas, o uso de

rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (RBPCP) margeia como uma alternativa forte e eficaz para melhorias de técnicas agrícolas e de baixo custo (Oliveira *et al.*, 2012).

As RBPCP são encontradas na rizosfera e podem estar em associação com as raízes, sendo responsáveis por potencializar o crescimento da planta, além de serem responsáveis pelo controle de patógenos, melhorar a absorção de nutrientes nas raízes e maior disponibilidade de nutrientes nas folhas, além de serem agentes biocontroladores na eliminação de pragas e/ou doenças (Galdiano Júnior, 2011; Melo, 2021). As rizobactérias podem ser usadas para aplicação em tratamento de sementes, mudas, tubérculos e raízes. Dentre os estudos com essas RBPCP, o gênero *Bacillus* tem se destacado em termos de pesquisa e resultados. Além de promotor de crescimento em plantas e com aumento da produtividade, trabalhos recentes mostram que o tratamento com *Bacillus subtilis* pode aumentar a formação de galhos e agir como biocontrolador de nematoides do solo. Segundo pesquisas, pode se verificar que as endotoxinas produzidas pela bactéria podem influenciar o ciclo de vida do nematoide e assim promover seu controle (Alves, 2018; Furmam *et al.*, 2019; Melo, 2021).

O *Bacillus subtilis* é uma bactéria encontrada no solo em associação com as raízes das plantas, de origem gram-positiva e aeróbica. O *Bacillus megaterium* é uma bactéria gram-positiva, aeróbica, tolerante a altas temperaturas, salinidade e pressão osmótica. Também é encontrada na rizosfera, em associação com as raízes das plantas, atuando na maior disponibilidade de nutrientes, como o fósforo e o potássio, e agindo de maneira direta na fixação biológica do nitrogênio. Essas bactérias irão atuar na defesa de plantas contra estresses bióticos, como no ataque de patógenos e de pragas, e abióticos (tolerância à déficits hídricos), sendo que essas também atuam no crescimento das plantas e fixação de nutrientes minerais, síntese de fitormônios e melhorias nas condições do solo, os quais são importantes no ciclo de vida das plantas. Trabalhos recentes com a utilização de *Bacillus* das espécies *subtilis* e *megaterium* proporcionaram níveis altos de produtividade, o que viabiliza a sua utilização na agricultura (Franchi, 2022; Furmam *et al.*, 2019).

As bactérias do gênero *Bradyrhizobium spp.*, destacam-se pela fixação de N, sendo bactérias gram-negativas de vida livre, com estruturas em geral oval e regular, que em contato com as raízes de plantas, são capazes de formar nódulos e assim auxiliar na fixação biológica de N₂ (FBN). Comumente, a bactéria também é chamada de rizóbio, e a infestação dela no sistema radicular, acontece inicialmente pelo contato e reconhecimento dessas bactérias, aderindo assim a estrutura da raiz e seus pelos radiculares. Após a invasão do pelo radicular, ocorre a formação do hilo que é o canal de infecção, onde a bactéria irá se deslocar. Ao chegar

à raiz, ocorre o processo de diferenciação celular que inicia o processo de fixação, sendo ele contínuo, e que resulta na formação do nódulo. Desta forma bactérias do gênero podem contribuir para menor uso de adubos nitrogenados, aumentar a produtividade da cultura e possibilitar aumento da fertilidade em solos (Hungria *et al.*, 2007; Hungria *et al.*, 2012).

As *Bradyrhizobium ssp.* são comumente utilizadas em solos de clima tropical, por serem bactérias mais resistentes a flutuação de temperaturas que ocorre em geral nesses tipos de solo e por se adaptarem muito bem às culturas desse tipo de clima. Este fator em geral é um dos mais limitantes a utilização de RBPCP em solos tropicais, uma vez que as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, onde ocorrerá nodulação, são altamente prejudicadas pela flutuação de temperaturas, ocorrendo elevado aumento ao decorrer do dia e variação em diferentes meses do ano. Na soja brasileira, a inoculação de bactérias do gênero *Bradyrhizobium ssp.* gera aumento da produtividade e é capaz de minimizar ou mesmo zerar a aplicação de adubos nitrogenados, visto que a rotação de culturas, uso de adubos verdes e manutenção da palhada, junto com as bactérias é capaz de suprir essa demanda. Trabalhos com coinoculação de *Bradyrhizobium ssp.* e *Bacillus ssp.* tem mostrado incrementos significativos em produção, por aumentar o espectro de ação dessas bactérias e principalmente pelo gênero *Bacillus ssp.* contribuir com a melhoria do sistema radicular e favorecer a exploração do perfil do solo, absorvendo maiores contingentes de nutrientes minerais (Alves *et al.*, 2003; Campo; Hungria, 2007; Hungria *et al.*, 2012; Furmam *et al.*, 2019; Franchi, 2022).

Entretanto, Souto (2020) discute que as principais dificuldades de uso desses microrganismos na agricultura são o não conhecimento de características do meio, ou seja, não saber como na dinâmica do solo essas bactérias se comportariam em diferentes meios, e sem competição rizosférica entre espécies, o que poderia gerar efeitos antagônicos e não sinérgicos. Em outro trabalho na área, realizado por Mendonça *et al.* (2020), houve a constatação de que essas RBPCP podem favorecer o desenvolvimento da planta, e elas podem suportar estresses do meio, como por exemplo estresses abióticos, diminuindo os efeitos relacionados a falta de água e também as altas temperaturas, o que justificaria pesquisas relacionadas ao uso de tal técnica, em virtude das mudanças climáticas globais.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

- Avaliar o efeito da inoculação de rizobactérias, bem como aplicação de Mg via foliar, em parâmetros fotossintéticos e seus efeitos na produtividade da cultura da soja em condições de campo.

3.2 Objetivos Específicos

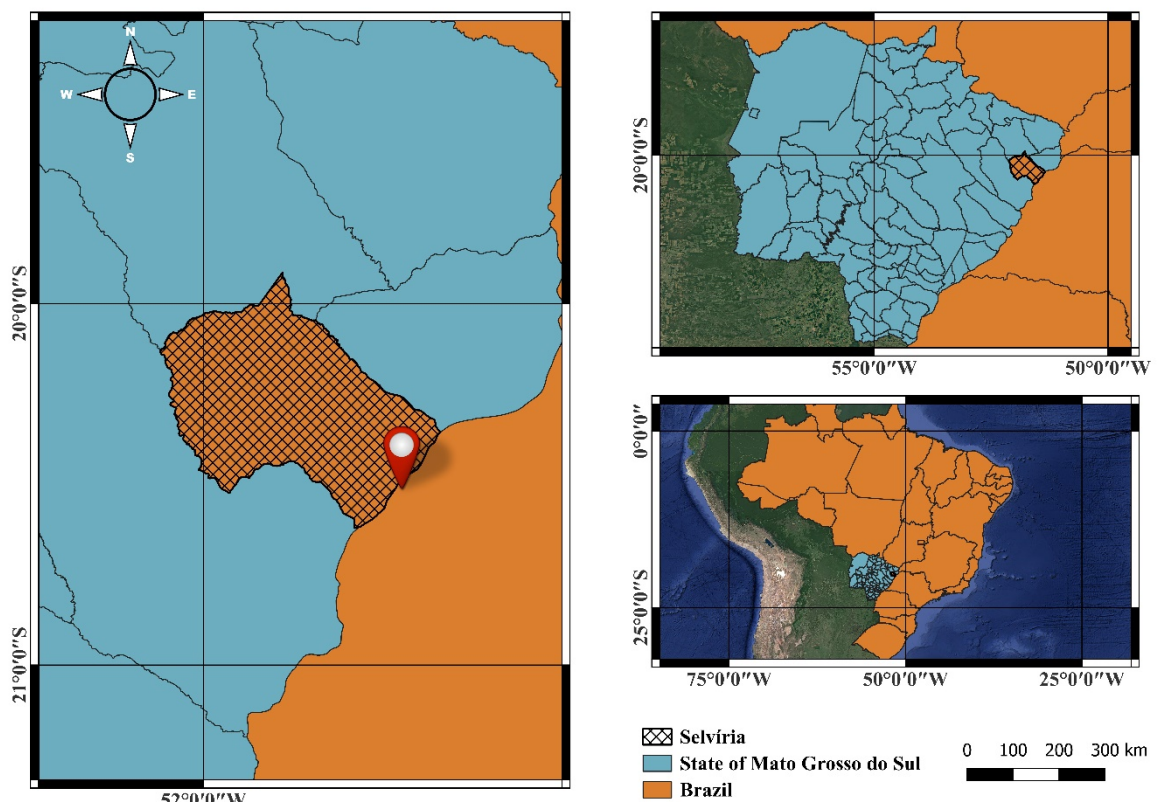
- Verificar a influência de rizobactérias em diferentes formas de coinoculação em solos com fertilidade corrigida em SPD de longa duração;
- Analisar o comportamento da soja quanto à fisiologia do estresse e taxa fotossintética na combinação de rizobactérias e uso ou não do Mg foliar;
- Mensurar indicadores de qualidade fisiológica da soja em técnicas de refinamento da produção agrícola.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Características da área e do local

O projeto de pesquisa foi conduzido em campo, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP- FEIS), localizada na cidade de Selvíria- MS, nas coordenadas geográficas de 20°18'S e 51°22'W e altitude de 370 m (Figura 1).

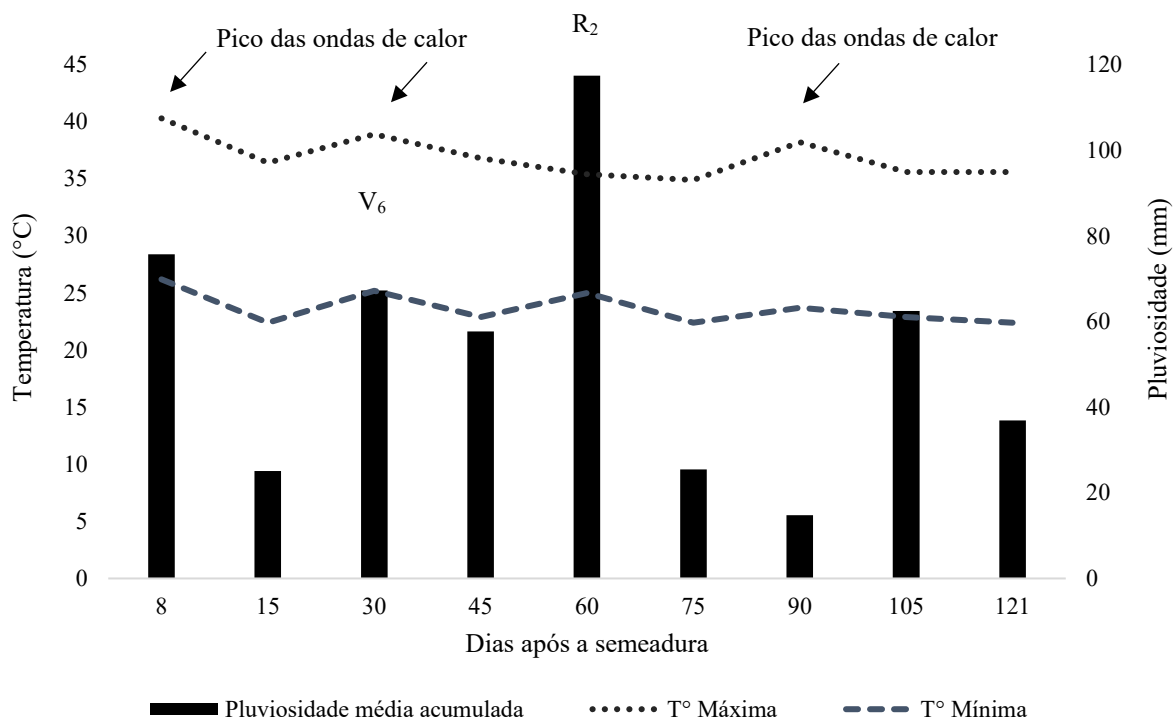
Figura 1 – Localização da área experimental no município de Selvíria - MS, Brasil



Fonte: Autoria própria.

Observando a classificação internacional de Köppen, pode-se afirmar que o clima do Município de Selvíria apresenta o subtipo Aw- tropical úmido, mesotérmico, com um inverno seco e verão quente, e irregularidade da precipitação anual das chuvas. A área de alocação do experimento pode ser considerada como plana, e os índices pluviométricos na região de Selvíria-MS, podem variar de 1200 até 1500 mm por ano (Sanesul, 2022). Os dados de precipitação, temperatura máximo e mínima durante o período de condução do experimento em campo são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Dados meteorológicos de temperatura máxima, mínima e precipitação pluvial, no município de Selvíria – MS, Brasil, 2023/24, durante o período de condução do experimento



Fonte: Autoria própria.

Nota: Dados de temperatura e pluviosidade: Clima Unesp (2023/2024).

Na área experimental, o solo em questão é classificado como um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico de textura argilosa (52% de argila no horizonte A) (SANTOS *et al*, 2018). Essa área tem um histórico de utilização em cultivos sob sistema plantio direto (SPD) por mais de 13 anos, e experimentos instalados anualmente com métodos conservacionistas (manutenção de palhada, rotação de culturas), cuja cultura antecessora foi o sorgo granífero em consórcio com capim Piatã (*Urochloa brizantha*).

Na área de realização do projeto, foram realizadas coletas de solo, com o objetivo de avaliar sua fertilidade. Foram realizadas coletas de solo na camada de 0-0,20 para obtenção de uma amostra composta, e posteriormente essa amostra foi analisada no Laboratório de Fertilidade do Solo da UNESP de Ilha Solteira. Os dados da fertilidade do solo na camada de 0-0,20 m são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química do solo na camada de 0-0,20 em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24

Camada	P _{resina}	MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V
m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	mmol _c dm ⁻³							%
0-0,20	50	24	5,3	2,5	32	23	34	0	57,5	91,5	63

Fonte: Autoria própria.

Nota: fósforo (P), matéria orgânica do solo (MO), acidez (pH), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), soma de bases (SB), saturação por bases (V%).

4.2 Instalação e Condução do Experimento

Na última semana de outubro de 2023, a flora daninha foi dessecada com herbicida glyphosate (1,56 kg ha⁻¹ do ingrediente ativo), e a soja semeada em 16 de novembro de 2023 (Figura 3). A cultivar escolhida foi a 80HO190 IPRO, de crescimento indeterminado, com alto potencial produtivo e resistente ao acamamento. O espaçamento adotado foi de 0,50 m entrelinhas com 14,5 sementes por metro, visando uma população de 220 mil plantas ha⁻¹.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 3 x 2, com 4 repetições, perfazendo um total de 24 parcelas experimentais. Foram avaliados 3 tratamentos com bactérias (*Bradyrhizobium japonicum* nas sementes (controle), combinação de *B. japonicum* nas sementes + *Bacillus subtilis* + *Bacillus megaterium* no sulco; *B. japonicum* nas sementes + *B. subtilis* + *B. megaterium* nas sementes), com ou sem a pulverização foliar do Mg. As sementes foram tratadas previamente com produto comercial a base de pirazol, estrubirulina e benzimidazol, sendo utilizado 100 mL do produto comercial para cada 50 kg de sementes.

A aplicação das RBPC seguiu a recomendação de cada produto (*Bradyrhizobium* e *Bacillus*). Para a inoculação com *B. japonicum* (estirpes Semia 5079 e 5080) via sementes, foi utilizado o inoculante líquido na dose recomendada pelo fornecedor (Soja – 2,0 x 10⁹ UFC/mL). Para coinoculação com o *Bacillus* foi utilizado produto comercial (mistura de *B. subtilis* e *B. megaterium* na concentração de 4,0 x 10⁹ UFC/mL) na dose recomendada pelo fabricante no tratamento de sementes e duas vezes a dose comercial para pulverização no sulco de semeadura. Para aplicação do produto a base de *Bacillus* na semente foi utilizada a dose padrão comercial de 100 mL do produto para cada 50 kg de sementes. Na aplicação via sulco, essa dose foi dobrada para 200 mL, aplicada com pulverizador costal, com volume de calda de 50 L ha⁻¹ diretamente sob sulco com vasão controlada. Os produtos comerciais utilizados foram aplicados

nas sementes a sombra, momentos antes da semeadura, e para pulverização no sulco, juntamente com a operação de semeadura pela manhã.

A aplicação do Mg foi realizada no estágio V₆ da soja (Figura 3) visto que a partir de V₅ pode-se definir o potencial de nós que a planta pode ter, e pelo considerável aumento de taxas metabólicas. O Mg foi aplicado via pulverização mecânica com velocidade reduzida nas primeiras horas do dia (7h00-9h30), com uma vazão do tanque estipulada em 250 L ha⁻¹. As avaliações fisiológicas na cultura, foram realizadas no estágio R₂, tendo em vista que esse estágio é de florescimento pleno, haja vista que a partir daí a necessidade de clorofila para fotossíntese é maior. Para não mascarar o real efeito do Mg, nas parcelas sem aplicação do MgSO₄, foi aplicado no mesmo dia, enxofre elementar (S), via foliar, na mesma dose equivalente de S do MgSO₄.

O produto escolhido para fornecimento de Mg foi o sulfato de magnésio (MgSO₄), em uma dose padrão de 8 kg ha⁻¹ ajustada a partir de diferentes trabalhos da literatura (Rodrigues *et al.* 2020; Deliboran *et al.* 2011; Branquinho *et al.* 2017). Para adubação de semeadura foram utilizados 300 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-16 (N-P₂O₅-K₂O), segundo recomendação baseada na análise de solo e na metodologia de Quaggio *et al.* (2022).

Figura 3 – Instalação, aplicação e avaliações na cultura da Soja no município de Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24



Fonte: Autoria própria.

Cada parcela experimental, foi constituída por 16 linhas de 10 m de comprimento, com espaçamento entrelinhas de 0,5 m, perfazendo 80 m². Para controle da flora daninha e de pragas, foram utilizados herbicidas e inseticidas seguindo as necessidades observadas em campo. A colheita das 24 parcelas experimentais para avaliação foi feita em 16/03/24, e no mesmo dia as avaliações dos componentes da produção e da produtividade de grãos.

4.3 Avaliações fisiológicas

4.3.1 Avaliação de trocas gasosas

Na época da avaliação (estádio fenológico R₂), a 3ª folha recém expandida da haste principal da soja em 10 plantas por parcela, foi utilizada para avaliar as trocas gasosas pela manhã (7 até 11 h) com um analisador de gás infravermelho (LI-6400; LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA) sob densidade de fluxo de fótons fotossintéticos de $1.800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentração de CO₂ no ar de $380 \mu\text{mol mol}^{-1}$, na temperatura de 21 a 25 °C (REIS et al., 2018). A taxa de assimilação de CO₂ (A), condutância estomática, taxa de transpiração (E), pigmentos totais (Pig) e a concentração interna de dióxido de carbono (Ci) foram determinadas. A partir disso, foi possível calcular o nível de eficiência instantânea do uso da água da folha (EIUA), dividindo os valores de A por E (Martineau *et al.*, 2017).

4.3.2 Pigmentos fotossintetizantes

Nas mesmas folhas de avaliação das trocas gasosas, foram analisados os pigmentos fotossintetizantes, quantificando os conteúdos de Clorofila a (Cla), b (Clb), totais (Clt) e carotenoides (CAR) utilizando como agente extrator o dimetilsulfóxido (DMSO). Uma fração de tecido vegetal foi coletada e cortada em fragmentos de 1 mm até obter 50 mg e incubado com 7mL de DMSO no escuro em banho-maria a 65°C por 30 min. (Hiscox; Israelstam, 1979). Além disso foi realizada a avaliação do índice SPAD para as mesmas folhas usadas para determinação dos pigmentos, usando-se o clorofilômetro SPAD-502.

4.3.3 Caracterização do metabolismo de nitrogênio e mecanismo de tolerância ao estresse

Através do método descrito por Bielecki e Turner (1966), os compostos nitrogenados foram extraídos das folhas de soja para as análises posteriores, conforme a descrição a seguir: Para 1 g de material fresco, acrescentou-se 10 mL de solução MCW (60% mL Metanol, 25% mL Clorofórmio, 15% mL H₂O). O material foi triturado e em seguida centrifugado. Após centrifugação, acrescentou-se 1 mL de Clorofórmio + 1,5 mL de H₂O, para cada 4 mL de sobrenadante. Armazenou-se 24 h em geladeira, para separação de fases e utilizou-se a fase hidrossolúvel para análise de ureídeos.

4.3.3.1 Determinação dos teores de aminoácidos

Foi utilizado 100 μL do extrato hidrossolúvel + 900 μL de H_2O + 500 μL de tampão citrato + 200 μL de ninhidrina 5% em metil glicol + 1 mL de solução KCN 0,0002 M, seguido de aquecimento a 100 °C por 20 minutos e resfriamento em temperatura ambiente para posterior inclusão de 1 mL de etanol 60%. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a $\lambda = 570 \text{ nm}$.

A curva padrão de solução leucina foi utilizada para determinar a concentração de aminoácidos solúveis totais (Yemm; Cocking; Ricketts, 1955).

4.3.3.2 Determinação dos teores de ureídeos

A primeira fase iniciou-se pela adição de 250 μL do extrato hidrossolúvel + 500 μL H_2O destilada + 1 gota de fenilhidrazina + 250 μL de NaOH 0,5 M, seguido de aquecimento a 100° C durante 8 minutos e resfriado à temperatura ambiente. Para quantificação de ácido alantóico, a hidrólise alcalina da etapa anterior foi suprimida. Na segunda fase, foi adicionado 250 μL de HCl 0,65 N, seguido de aquecimento a 100 °C durante 4 minutos. Após resfriamento à temperatura ambiente, foi adicionado 250 μL de tampão fosfato pH 7,0 0,4 M e 250 μL de solução de fenilhidrazina 0,33%. Após 5 minutos à temperatura ambiente, colocou-se as amostras em banho de gelo por 5 minutos e, em seguida, adiciona-se 1250 μL de HCl concentrado previamente gelado e 250 μL de solução de ferrocianeto de potássio 1,65%. Retirou-se do banho de gelo e, após 15 minutos à temperatura ambiente, foi realizada a leitura em espectrofotômetro a $\lambda = 535 \text{ nm}$.

A concentração de ureídeos foi mensurada utilizando curva padrão de solução de alantoína (Der Drift; De Windt e Vogels, 1970).

4.3.3.3 Determinação dos teores de proteínas totais solúveis nas folhas

Os teores de proteínas solúveis totais nas folhas foram mensurados por meio da reação com azul de coomassie (Bradford, 1976), para o ensaio foram utilizados 50 μL do extrato alcalino (fração hidróxido de sódio) + 2500 μL da solução de Bradford + 5 minutos em repouso. Em seguida, foi realizada a determinação em espectrofotômetro a $\lambda = 595 \text{ nm}$. A concentração de proteínas foi mensurada utilizando a curva padrão de solução BSA.

4.3.3.4 Peróxido de hidrogênio

A quantificação dos teores de peróxido de hidrogênio foi realizada de acordo com o método descrito por Alexieva *et al.* (2001). Aproximadamente 250 mg de folhas foram maceradas em N líquido e homogenizadas em 3 mL de solução 0,1% de TCA (m/v) com 20% de PVPP (m/m). O homogenizado foi dividido em dois microtubos de 1,5 mL e centrifugado a 12100 g por 5 minutos; 0,2 mL do sobrenadante foi transferido a um novo microtubo o qual recebeu 0,8 mL de solução 1 M de KI e 0,2 mL de solução 100 mM de tampão fosfato de potássio pH 7,5; essa mistura foi posteriormente incubada no gelo e no escuro por 1 hora, após esse período foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 390 nm.

4.4 Avaliações dos componentes da produção e produtividade da soja

As avaliações realizadas foram: **População de Plantas (POP):** foram contadas as plantas que compunham 4 m das quatro linhas centrais de cada parcela, e posteriormente com esse valor obteve-se o número de plantas por hectare (planta ha^{-1}). **Altura de Plantas (AltP):** realizada na área útil de cada parcela, analisando-se dez plantas consecutivas na linha. A planta foi medida desde sua extremidade inferior no solo, até a parte superior e o valor convertido em metros. **Altura da inserção da primeira vagem (AIPV):** a medição se realizou na mesma área utilizando-se as mesmas plantas que foram usadas para mensurar a altura. Foi realizada medindo-se a planta desde o solo, até a primeira vagem. **Número de Vagens por Planta (NVP):** mensurada utilizando-se o número de vagens de 10 plantas por parcela e realizada a média aritmética desta. **Número de grãos por planta (NGP):** calculada a partir do número de grãos das mesmas 10 plantas por parcela, e depois disso calculada sua média. **Massa de 100 grãos (M100):** calculada a partir da separação de quatro amostras de grãos e levadas ao laboratório para contagem no contador eletrônico. A massa dos cem grãos foi feita em balança de precisão (0,01 g) e a umidade do grão corrigida a 13% (base úmida). **Produtividade de grãos (PROD):** as plantas centrais das parcelas (4 m de 4 linhas) foram colhidas manualmente, trilhadas e os grãos pesados, assim após obtenção da produtividade por parcela, a umidade foi corrigida até 13% e os valores foram transformados em kg ha^{-1} .

4.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram tabulados e analisados com o auxílio do software R versão 4.3.2 (*Development Core Team*, 2024). Os resultados foram submetidos a análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$). A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro Wilk. Constatado resultado significativo pelo teste F, para a presença do inoculante comercial e aplicação de Mg, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Além disso, para melhor interpretação e correlação dos dados foi realizada a análise de componentes principais (PCA).

Para análise de variância e construção do PCA no software R foram utilizados os pacotes “ExpeDes.pt”, “FactoMineR”, “Shiny”, “FactoInvestigate” e “ggplot2”. Os gráficos das interações foram desenvolvidos a partir do software *SigmaPlot* versão 15.0 (*Systat Software Incorporation*, 2023).

5 RESULTADOS

Na tabela 2, após os resultados terem sido analisados constatou-se que para presença da pulverização foliar do Mg, as médias apresentaram significância nos teores de clorofila a, clorofila b, clorofilas totais, carotenoides e feofitina, indicando que o Mg foi capaz de contribuir com o aumento desses compostos. Com relação à inoculação, foi possível observar médias significativas nos teores de feofitina, sendo que os tratamentos coinoculados tanto via sulco quanto sementes, apresentaram resultados superiores pelo teste ($p \leq 0,05$). Porém, para feofitina, o tratamento via sulco não diferiu do tratamento controle.

Tabela 2 – Análise de variância para as variáveis clorofila a, clorofila b, clorofilas totais, carotenoides e feofitina na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24

	Clorofila a mg/gMF	Clorofila b mg/gMF	Clorofilas Totais mg/gMF	Carotenoides mg/gMF	Feofitina índice
Pulverização (P)					
com Mg	6,31 a	0,85 a	7,36 a	0,74 a	1,53 a
sem Mg	5,27 b	0,61 b	5,94 b	0,62 b	1,44 b
Inoculação (I)					
controle	5,80	0,68	6,60	0,64	1,44 b
sulco	5,50	0,75	6,55	0,68	1,52 a
semente	5,88	0,75	6,79	0,71	1,50 ab
Valores de Pr>Fc					
Pulverização	0,001*	0,001*	0,001*	0,02*	0,001*
Inoculação	0,06 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,03*
P x I	0,80 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,91 ^{ns}	0,88 ^{ns}
Média Geral	5,80	0,73	6,65	0,68	1,48
DMS	0,37	0,08	0,43	0,09	0,05
CV(%)	7,33	13,34	7,40	14,99	3,72

Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: *significativo $p \leq 0,05$; ^{ns} não significativo $p \leq 0,05$; Mg: magnésio; controle: *B. japonicum*; sulco: *Bradyrhizobium japonicum* + combinação de *B. subtilis* e *B. megaterium* no sulco; semente: *B. japonicum* + combinação *B. subtilis* e *B. megaterium* nas sementes; Médias seguidas da mesma letra, dentro de Pulverização (P) e Inoculação (I) não diferem estatisticamente a 5 % de significância.

Para as análises dos teores de ureídeos e SPAD, é possível observar que as médias foram significativas ($p \leq 0,05$) (Tabela 3). Nos resultados para inoculação, o tratamento controle e via sementes, apresentaram médias superiores em relação ao tratamento via sulco para os resultados do teor de ureídeos. A maior média foi no tratamento controle, sendo que esse impacto em ureídeos nos tratamentos com coinoculação pode ser reflexo da competição entre esses

microrganismos na rizosfera. Para o índice SPAD, os resultados foram significativos ($p \leq 0,05$) tanto para aplicação foliar com Mg, quanto para inoculação. Nos tratamentos que receberam a pulverização do Mg foliar, foi observado um incremento médio de 25,5% em comparação com as parcelas sem aplicação de Mg, devido ao fato de que o nutriente é o íon central da molécula de clorofila, demonstrando que ele pode vir a regular a fisiologia fotossintética da planta.

Tabela 3 – Análise de variância para as variáveis ureídeos, malondialdeído (MDA), proteína, peróxido, aminoácidos (AA) e índice relativo de clorofila (SPAD) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24

	Ureídeos	MDA	Proteína	Peroxido	AA	SPAD
	μmoles gMF ⁻¹	μmoles gMF ⁻¹	μmoles gMF ⁻¹	μmoles gMF ⁻¹	μmoles gMF ⁻¹	Índice
Pulverização (P)						
com Mg	2,40	3,10	3,70	1,10	22,20	97,90 a
sem Mg	2,60	2,90	3,80	0,70	20,50	72,90 b
Inoculação (I)						
controle	3,30 a	3,20	3,60	0,70	21,60	74,10 b
sulco	1,70 b	2,90	4,20	0,85	21,50	92,30 a
semente	2,50 ab	3,00	3,40	1,24	20,90	89,80 ab
Valores de Pr>Fc						
Pulverização	0,52 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,0004*
Inoculação	0,006*	0,41 ^{ns}	0,085 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,035*
P×I	0,89 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,95 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Média Geral	2,50	3,02	3,70	0,90	21,30	85,40
DMS	0,74	0,42	0,59	0,85	2,92	11,77
CV(%)	34,40	16,30	18,50	10,00	15,70	15,90

Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: *significativo $p \leq 0,05$; ^{ns} não significativo $p \leq 0,05$; Mg: magnésio; controle: *B. japonicum*; sulco: *Bradyrhizobium japonicum* + combinação de *B. subtilis* e *B. megaterium* no sulco; semente: *B. japonicum* + combinação *B. subtilis* e *B. megaterium* nas sementes; Médias seguidas da mesma letra, dentro de Pulverização (P) e Inoculação (I) não diferem estatisticamente a 5 % de significância.

Para o fator inoculação com as RBPCP, médias significativas para o índice SPAD foram encontradas nos tratamentos via sulco e sementes, sendo que a aplicação no sulco de semeadura apresentou maiores incrementos. Os resultados médios das parcelas com coinoculação para o tratamento sulco apresentaram cerca de 19,6% maior teor de pigmentos fotossintetizantes do que o controle. Para o tratamento via sementes, o incremento foi de 17,5% em relação ao

controle, o que deixa claro que, quando coinoculadas, as RBPCP podem auxiliar numa melhoria metabólica importante.

Os resultados mostram que as médias para A, CI e EIUA foram significativas ($p \leq 0,05$) para a interação P×I (pulverização × inoculação) (Tabela 4). Com os resultados isolados da inoculação com RBPCP, verifica-se que os tratamentos com aplicação via sulco e sementes, foram capazes de aumentar os índices de E e GS. Para os resultados de E, os tratamentos apresentaram um ganho aproximado de 9% em relação ao tratamento controle. O tratamento via sementes, apresentou a maior média para GS, o que representa um ganho aproximado de 27,85% em relação ao tratamento controle. Mais uma vez, fica claro que a coinoculação é capaz de melhorar índices metabólicos importantes que regulam as taxas fotossintéticas das plantas.

Os resultados para o desdobramento das avaliações de A, CI e EIUA, são apresentados na Figura 4. Para A, é possível verificar que o tratamento com Mg potencializou os resultados de inoculação no tratamento com aplicação via sementes. O ganho observado em relação ao tratamento controle foi de 40%, reflexo do aumento do conteúdo de Mg que proporcionou altos resultados de pigmentos fotossintetizantes.

Similarmente ao A, para EIUA, verificou-se que o tratamento com Mg associado a coinoculação via sementes, auxiliou em ganhos na EIUA, em torno de 28% se comparado ao controle. Esse resultado mostra a razão da regulação interna do conteúdo de água da planta, o que indica melhor regulação na aplicação conjunta do Mg e coinoculação via sementes. O aumento desse índice, justifica a utilização do Mg e das bactérias como bioestimuladoras fisiológicas. Tal fato está ligado principalmente ao efeito do Mg na fisiologia da planta e a estimulação da promoção do crescimento pelas bactérias.

Para o CI, resultados significativos do desdobramento foram constatados com a coinoculação, independentemente se no sulco ou nas sementes. Para Mg, em CI não foram observadas diferenças significativas no desdobramento. Os resultados para A e EIUA demonstram que nas condições climáticas as quais esse experimento foi submetido (Figura 2), aplicar Mg aliado a coinoculação via sementes foi benéfica para cultura da soja, mesmo em solo com fertilidade corrigida e com alto teor de Mg no solo. Essa combinação foi capaz de aumentar consideravelmente os índices de A e EIUA.

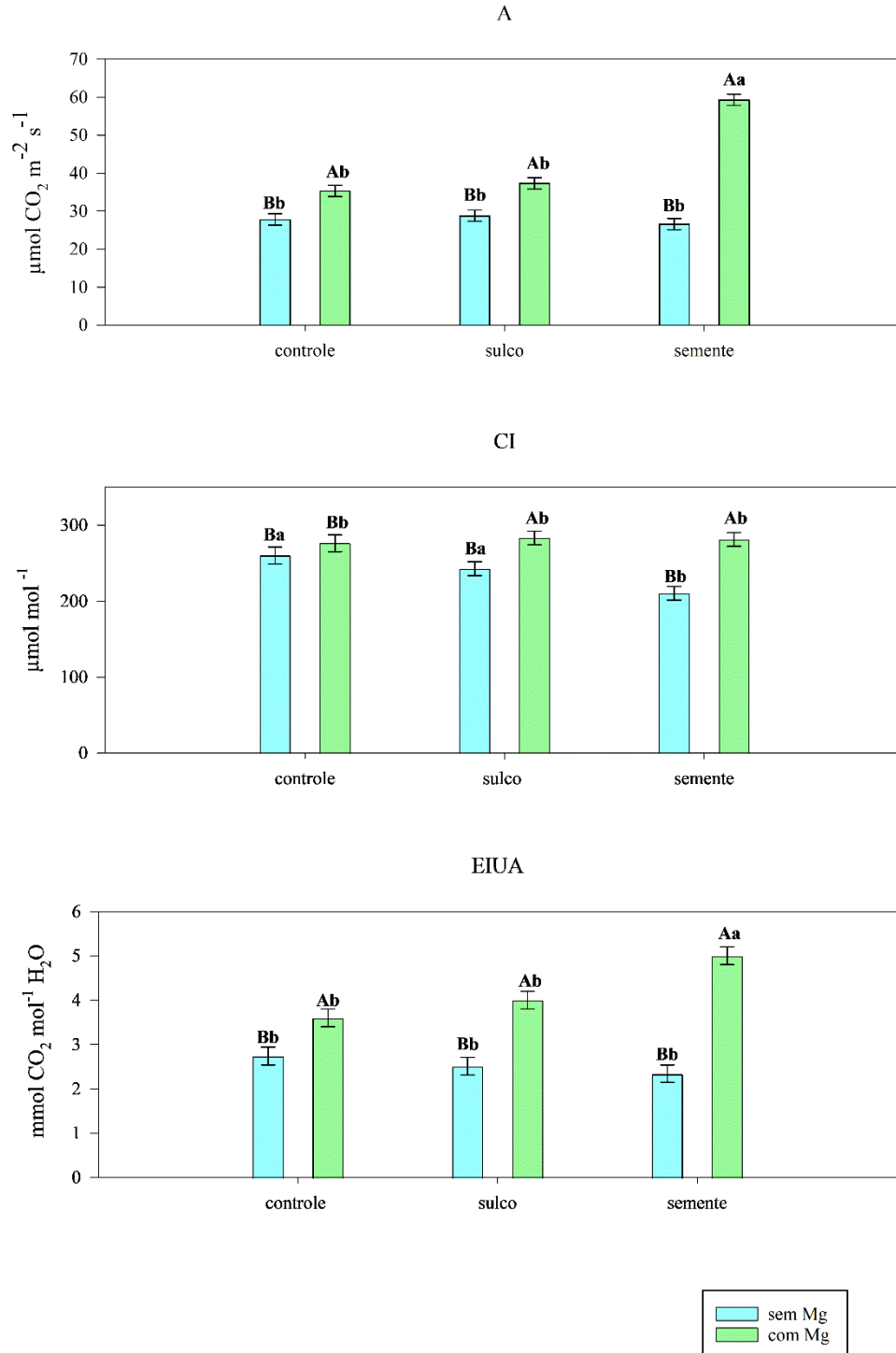
Tabela 4 – Análise de variância para as variáveis Taxa fotossintética (A), Transpiração (E), Condutância estomática (GS), Carbono interno (CI) e Eficiência instantânea do uso da água (EIUA) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS

	A	E	GS	CI	EIUA
	$\mu\text{mol CO}_2$ $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmol H}_2\text{O}$ $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmol H}_2\text{O}$ $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol mol}^{-1}$	mmol CO_2 $\text{mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$
	Pulverização (P)				
com Mg	44,00	11,10	1167,67	279,83	4,00
sem Mg	27,70	11,70	1111,08	237,58	2,40
	Inoculação (I)				
controle	31,50	10,40 b	949,50 b	245,50	2,90
sulco	33,10	11,30 ab	1152,60 ab	262,62	3,20
semente	43,00	11,70 a	1316,00 a	268,00	3,70
	Valores de Pr>Fc				
Pulverização	0,0001*	0,85 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,0001*	0,0001*
Inoculação	0,0001*	0,026*	0,009*	0,08 ^{ns}	0,02*
P×I	0,0001*	0,48 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,04*	0,002*
Média Geral	35,90	11,10	1139,40	258,70	3,30
DMS	3,21	0,79	117,00	17,12	0,41
CV(%)	10,30	8,30	17,90	7,60	14,50

Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: *significativo $p \leq 0,05$; ^{ns} não significativo $p \leq 0,05$; Mg: magnésio; controle: *B. japonicum*; sulco: *Bradyrhizobium japonicum* + combinação de *B. subtilis* e *B. megaterium* no sulco; semente: *B. japonicum* + combinação *B. subtilis* e *B. megaterium* nas sementes; Médias seguidas da mesma letra, dentro de Pulverização (P) e Inoculação (I) não diferem estatisticamente a 5 % de significância.

Figura 4 – Desdobramento para variáveis Taxa fotossintética (A), Carbono interno (CI) e Eficiência instantânea do uso da água (EIUA) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, Selvíria-MS, Brasil, safra 2023/24. Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas dentro de inoculação/coinoculação e minúsculas dentro de aplicação do Mg não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Avaliando os componentes biométricos e da produção da soja (Tabela 5), a AltP e a AIPV apresentaram resultados significativos para inoculação ($p \leq 0,05$). O tratamento controle

apresentou a maior média para AltP, dado o uso de maneira isolada do *Bradyrhizobium*, sem competição rizosférica com o *Bacillus* spp. A menor AIPV, foi observada no tratamento com coinoculação via sementes.

Tabela 5 – Análise de variância para as variáveis Altura de planta (AltP), Altura de inserção da primeira vagem (AIPV), População de plantas (Pop), Número de vagens por planta (NVP), Número de grãos por vagem (NGP), Massa de 100 grãos (M100) e Produtividade de grãos (Prod), para cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24

	AltP	AIPV	Pop	NVP	NGP	M100	Prod
	m	m	Plantas ha ⁻¹ × 1000			g	kg ha ⁻¹
	Pulverização (P)						
com Mg	1,30	0,33	169,80	83	155	17,19	3792 a
sem Mg	1,30	0,33	161,40	69	131	16,75	2700 b
	Inoculação (I)						
controle	1,36 a	0,34 a	163,90	70	116	17,04	3056
sulco	1,30 b	0,33 a	172,20	69	135	16,93	3285
semente	1,24 c	0,30 b	160,80	89	178	16,94	3397
	Valores de Pr>Fc						
Pulverização	0,54 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,0046*	0,03*	0,46 ^{ns}	0,001*
Inoculação	0,001*	0,001*	0,76 ^{ns}	0,002*	0,0005*	0,98 ^{ns}	0,44 ^{ns}
P×I	0,3 ^{ns}	0,34 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,004*	0,006*	0,11 ^{ns}	0,3 ^{ns}
Média Geral	1,30	0,33	165,6	76	143	16,97	3246
DMS	0,031	0,015	27,66	9,28	21,74	1,25	462,18
CV(%)	2,80	5,50	19,20	14,00	17,50	8,50	16,4

Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: *significativo $p \leq 0,05$; ns não significativo $p \leq 0,05$; Mg: magnésio; controle: controle: B. japonicum; sulco: Bradyrhizobium japonicum + combinação de B. subtilis e B. megaterium no sulco; semente: B. japonicum + combinação B. subtilis e B. megaterium nas sementes; Médias seguidas da mesma letra, dentro de Pulverização (P) e Inoculação (I) não diferem estatisticamente a 5 % de significância.

O tratamento com adubação foliar de Mg proporcionou as maiores médias para produtividade (Prod) de grãos de soja ($p \leq 0,05$). Em média houve um ganho de 1092 kg ha⁻¹, cerca de 18 sacas, apenas pela aplicação do Mg foliar. Para o fator inoculação, não foram observadas médias significativas, sendo que tal resultado é explicado pela condução do experimento em solo que se encontra em SPD por 13 anos, demonstrando que o mesmo pode

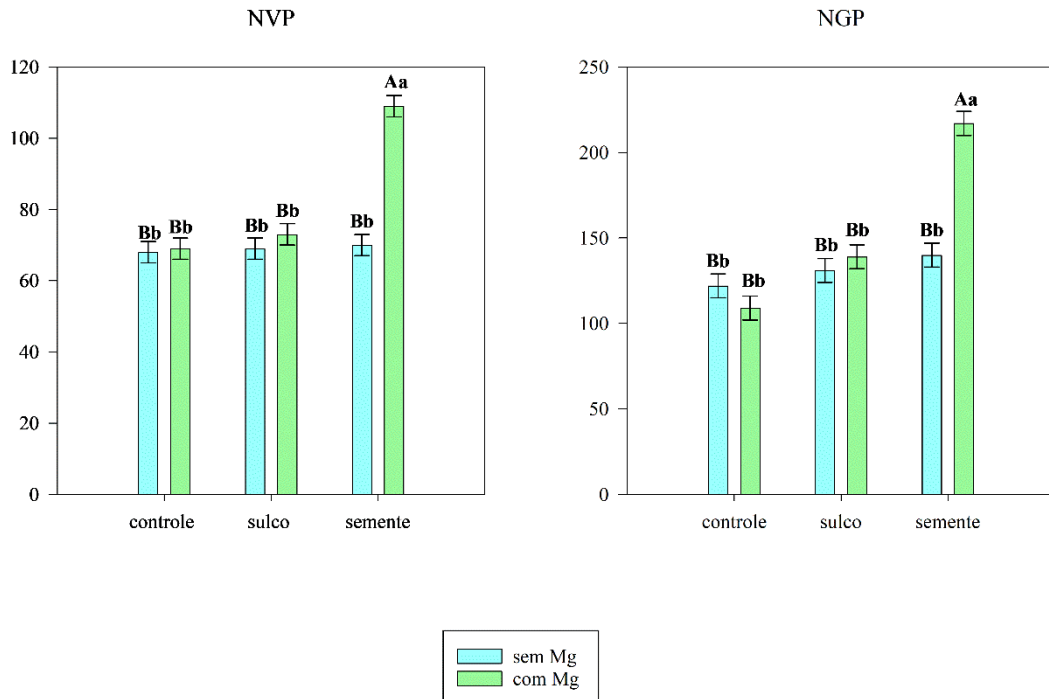
ser responsável por adequada nutrição, visto boa ciclagem de nutrientes e perfil fértil do solo. Esse resultado mostra que aliar a pulverização foliar do Mg em áreas que preconizam os preceitos do SPD pode ser uma alternativa para aumento de produção. Devido as condições atuais de mudanças climáticas, que cada vez mais submetem as plantas a situações de estresses, é necessário refinar a produção agrícola, buscando aliar técnicas que mitiguem esses estresses.

A alta taxa de A nas plantas com a pulverização de Mg foliar se refletiu em ganhos produtivos importantes. Enquanto que os resultados de NVP e NGP apresentaram médias significativos ($p \leq 0,05$) para a interação $P \times I$.

Analisando o desdobramento, verifica-se que o tratamento com aplicação do Mg e a coinoculação via sementes proporcionou maior NVP, com aumento de 39 vagens por planta (Figura 5). O desdobramento demonstra que, assim como em NVP, a aplicação do Mg atrelado com a coinoculação via sementes, proporcionou um aumento aproximado de 100 grãos por planta em comparação ao tratamento controle e que não recebeu aplicação do Mg (Figura 5). Esses resultados sugerem que a coinoculação destas rizobactérias é capaz de melhorar o metabolismo das plantas, o que pode ser refletido em ganhos de componentes produtivos. Atrelado a utilização do Mg foliar, verifica-se que há uma potencialização nos ganhos produtivos, o que justifica a coinoculação via sementes e a aplicação do Mg.

Os resultados do PCA confirmam o que foi avaliado na estatística descritiva unidirecional. A dimensão 1 representou uma variância de 29,54%, enquanto a dimensão 2 foi responsável por uma variância de 14,93%. Os dados de correlação para o PCA são apresentados na tabela 6.

Figura 5 – Desdobramento para variável Número de vagens por planta (NVP) Número de grãos por planta (NGP) na cultura da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24. Médias seguidas das mesmas letras maiúsculas dentro de inoculação/coinoculação e minúsculas dentro de aplicação do Mg não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)



Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Para a presença ou ausência do Mg foliar, o PCA (Figura 6) indica que os resultados para aplicação de Mg encontram-se à direita do gráfico (dimensão 1) compartilhando resultados significativos para aminoácidos (AA), Pop, CI, Prod, A, EIUA, Pig, NVP e NGP. Destaque-se os altos valores de correlação para A, EIUA e NGP, que na dimensão apresentaram valores respectivos de 0,91; 0,81 e 0,90. É importante destacar que essa dimensão ainda apresentou um baixo valor de correlação para Perox, que é indicativo direto de estresse, mostrando que o Mg é capaz de auxiliar no metabolismo. Além disso também foram observados baixos resultados na correlação para E, mostrando que pelos altos valores de EIUA, as plantas com Mg regulam melhor seu conteúdo de água. Para ausência de Mg, na dimensão 2, foi observado pelos resultados do PCA, uma baixa correlação para o teor de Prot.

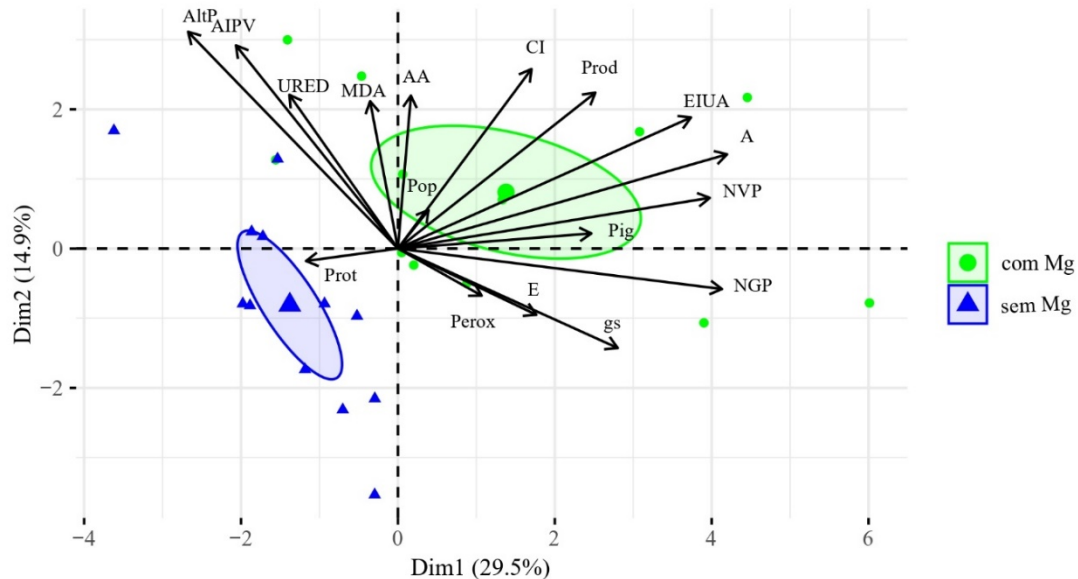
Tabela 6 – Dados de correlação para análise de componentes principais (PCA) na cultura da soja sob presença ou ausência da pulverização de magnésio foliar e rizobactérias promotoras de crescimento, em Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24

PCA	PC1	PC2
Autovalor	5,02	2,54
Variância (%)	29,54	14,93
Variância acumulada (%)	29,54	44,47
Variáveis	Correlação	
URED	-0.30	0.48
MDA	-0.08	0.46
Prot	-0.25	-0.04
Perox	0.23	-0.15
AA	0.04	0.48
Pig	0.53	0.05
A	0.91	0.29
E	0.38	-0.21
gs	0.61	-0.31
CI	0.37	0.56
EIUA	0.81	0.41
Pop	0.08	0.12
AIPV	-0.45	0.63
AltP	-0.58	0.67
NGP	0.90	-0.13
NVP	0.86	0.16
Prod	0.55	0.49

Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: URED: ureídeos; MDA: malondialdeído; Prot: proteína, Perox: peróxido de hidrogênio; AA: aminoácidos; Pig: Pigmentos fotossintetizantes (SPAD); A: taxa fotossintética; E: transpiração; gs: condutância estomática; CI: carbono interno; EIUA: eficiência instantânea do uso da água; Pop: população de plantas; AltP: altura de planta; NGP: número de grãos por planta; NVP: número de vagens por planta; Prod: produção.

Figura 6 – Análise de componentes principais (PCA) em função da aplicação ou não de magnésio sob os parâmetros fisiológicos e produtivos da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, no município de Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24

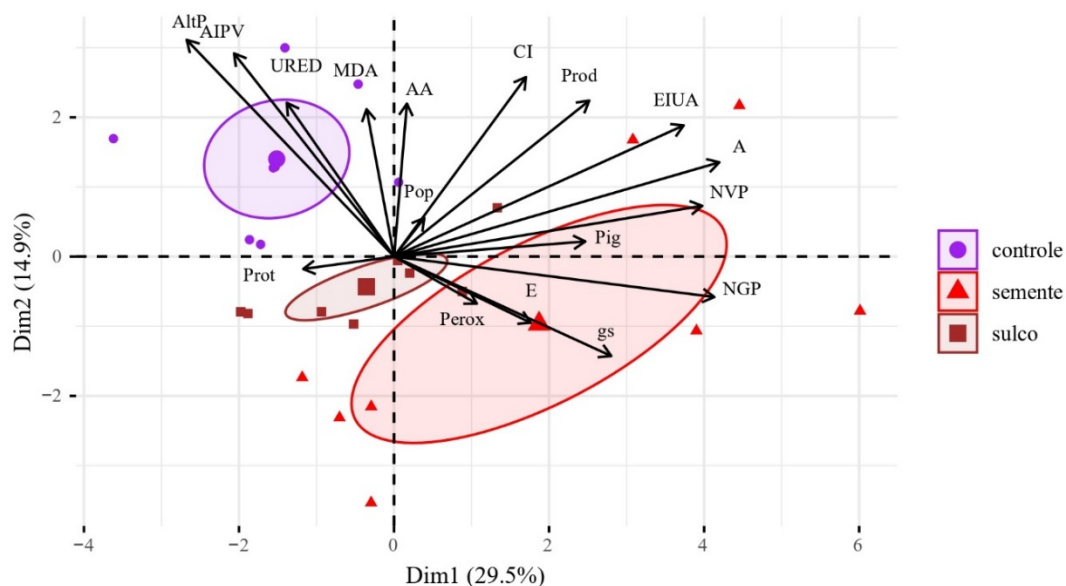


Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: URED: ureídeos; MDA: malondialdeído; Prot: proteína, Perox: peróxido de hidrogênio; AA: aminoácidos; Pig: Pigmentos fotossintetizantes (SPAD); A: taxa fotossintética; E: transpiração; gs: condutância estomática; CI: carbono interno; EIUA: eficiência instantânea do uso da água; Pop: população de plantas; AltP: altura de planta; NGP: número de grãos por planta; NVP: número de vagens por planta; Prod: produção.

Para os resultados do fator inoculação, é possível notar que os valores a direita do gráfico (dimensão 1) representam os resultados da coinoculação via sementes, que apresentou os melhores indicativos (Figura 7). Além disso, esse tratamento foi capaz de diminuir os teores do Perox e de E, indicando mitigação do estresse. Os resultados para o tratamento controle, encontram-se a esquerda do gráfico (dimensão 2), compartilhando altos valores para AltP, AIPV, URED e MDA e baixos valores de Prot. (Figura 7). O tratamento com coinoculação via sulco, a esquerda do gráfico (dimensão 2), apresenta baixa correlação para Prot, Perox, E, gs e NGP. Para esse estudo, a aplicação das RRBPCP's via sementes foi o que apresentou os melhores resultados na estatística descritiva e também nos resultados do PCA, o que indica e viabiliza sua utilização em trabalhos de campo.

Figura 7 – Análise de componentes principais (PCA) em função da inoculação ou coinoculação de rizobactérias sob os parâmetros fisiológicos e produtivos da soja, em função de RBPCP e aplicação foliar de Mg, no município de Selvíria - MS, Brasil, safra 2023/24



Fonte: Dados de pesquisa do autor.

Nota: URED: ureídeos; MDA: malondialdeído; Prot: proteína, Perox: peróxido de hidrogênio; AA: aminoácidos; Pig: Pigmentos fotossintetizantes (SPAD); A: taxa fotossintética; E: transpiração; gs: condutância estomática; CI: carbono interno; EIUA: eficiência instantânea do uso da água; Pop: população de plantas; AltP: altura de planta; NGP: número de grãos por planta; NVP: número de vagens por planta; Prod: produção.

Sendo assim, os resultados deste trabalho confirmam que o Mg aliado a coinoculação com o produto à base de mix de *Bacillus* foi capaz de melhorar, consideravelmente, os índices fisiológicos das plantas e refletir em ganhos em componentes produtivos como NVP e NGP. Os resultados do PCA ainda confirmaram que tanto a aplicação do Mg foliar, quando a coinoculação via sementes, foram capazes de mitigar efeitos estressantes pela baixa correlação para Perox e regular melhor seu conteúdo de água (alto EIUA e baixo E). Tais resultados são promissores, representando um avanço considerável na pesquisa científica que precisa estar focada nas mudanças climáticas. Além disso, a recomendação desse estudo alia preceitos importantes da sustentabilidade agrícola, essencial para uma agricultura regenerativa e eficiente. Aliar diferentes técnicas e refinar a produção agrícola parece ser o caminho para solucionar os novos desafios de produção agrícola.

6 DISCUSSÃO

Foi possível notar significativa melhoria na fisiologia das plantas que receberam a aplicação de Mg via foliar, sendo que o destaque vai para teor de clorofilas a e b, clorofila total, carotenóides, feofitina, pigmentos totais, A, CI e EIUA (Tabelas 2, 3, 4). Assim, ficou evidente, o papel deste nutriente, que é o íon central da molécula de clorofila. Portanto, mesmo em solo corrigido, com alto teor de Mg, seu fornecimento via foliar, em momentos críticos, torna-se essencial para suprir a necessidade das plantas (Cakmak, 2013) pelo efeito bioestimulante. Cerca de 15 a 35 % de todo Mg absorvido pelas plantas está ligado aos cloroplastos, principalmente a clorofila (Chen *et al.* 2018). Trabalhando com a cultura do tomate, Nas e Zengin (2024), também observaram aumento nos teores de clorofila foliar em torno de 85%. Por isso, é notório a melhoria nos parâmetros dos pigmentos de maneira geral, como os verificados nesse estudo, principalmente no teor de clorofila, o que foi revertido na fisiologia fotossintética da planta.

O fornecimento de Mg em momentos chaves do desenvolvimento vegetal, é uma alternativa para manter ou aumentar a taxa fotossintética (A), consequentemente aumentando a produção. Para esse trabalho, foi possível notar que ao aplicar Mg em V₆ da soja, houve aumento considerável em teores de pigmentos fotossintetizantes nas folhas, pois também Wang *et al.* (2020), afirmaram que a aplicação de magnésio é capaz de melhorar a capacidade fotossintética, principalmente nos teores de pigmentos fotossintetizantes. Em seu trabalho, os autores constataram que os ganhos médios com aplicação do Mg em plantas no mundo, podem proporcionar um acréscimo médio de até 8,5% em produtividade das culturas, ficando abaixo do obtido nesta pesquisa.

As plantas também apresentaram resultados positivos para A, CI, e EIUA, potencializado pela coinoculação via sementes. Os resultados de A e EIUA, chamam atenção e indicam a viabilidade da aplicação foliar do Mg, mesmo em solos corrigidos, visto que as plantas de soja no período de cultivo em Selvíria-MS, passaram por períodos críticos de ondas de calor, chegando a temperaturas médias de 37,5°C e sensações térmicas em torno dos 47°C (Figura 2). Sendo assim, pode se afirmar que a aplicação do Mg via foliar e a coinoculação contribuíram para diminuir perdas produtivas nesse período, visto a melhora na fisiologia fotossintética das plantas.

Para EIUA, é possível verificar que plantas que receberam a coinoculação via sementes, combinadas com aplicação do Mg em V₆, apresentaram resultados superiores em relação ao controle e coinoculação via sulco. Tal fato é importante porque constatou a capacidade da planta

em melhor regular suas taxas metabólicas, e capacidade de suportar estresses, ligado principalmente a promoção de crescimento pelas bactérias e ao efeito do Mg na fisiologia fotossintética. Tais dados corroboram com o trabalho de Rodrigues *et al.* (2021), com soja e milho e aplicação de Mg foliar. Nesse trabalho foi verificado que a aplicação de Mg resultou em aumento da sua concentração na soja (10,4%) e no milho, tanto na primeira, quanto na segunda safras (13,3 e 14,4%, respectivamente). Os autores ainda verificaram que, a aplicação de Mg fez com que o desempenho de trocas gasosas aumentasse em ambas as culturas, além de incrementar os valores da taxa fotossintética líquida e também da condutância estomática (49 e 21% para soja e 29 e 47% para o milho). Em suma, plantas que receberam a dose de Mg foliar foram mais eficientes fotossinteticamente e na transformação do gás carbônico em esqueletos de carbono (açúcar), assim perdendo menos água durante o processo. Logo, tanto a cultura da soja quanto a do milho, converteram o açúcar produzido pela fotossíntese em maior número de grãos por planta, conforme constatado também para a soja (Tabela 5), o que viabiliza a pesquisa e comprova os resultados.

No solo em questão, com fertilidade corrigida e alto teor de Mg, não foi possível notar diferenças nas médias em relação a aplicação do Mg para ureídeos. Como a aplicação foliar forneceu o Mg em estágio V₆, acredita-se que para ureídeos a necessidade da planta foi suprida pelo estoque do solo. Porém, estudos de Peng *et al.* (2018), verificaram que o suprimento adequado de Mg para soja pode auxiliar na nodulação e consequentemente aumentar o metabolismo de ureídeos, influenciando na fixação biológica do nitrogênio (FBN). Quanto mais cedo fornecido o Mg se via solo, mais o metabolismo do nitrogênio pode ser afetado, auxiliando na FBN.

Para GS, os resultados de inoculação foram superiores quando coinoculados via sementes. Analisando os resultados de A e GS, é possível verificar que tanto a utilização das RBPCs, quanto a aplicação de Mg foliar, foram essenciais para auxiliar na melhoria das taxas fisiológicas, indicando a adequada capacidade dessas plantas em realizarem trocas gasosas e continuarem seu desenvolvimento, sendo que tal melhoria contribuiu para ganhos produtivos. Portis e Heldt (1976) e Bhat *et al.* (2017), confirmam que tal eficiência no balanço nutricional de Mg é essencial, pois o elemento também é indispensável para o controle do empilhamento dos tilacóides e para síntese de diversas enzimas no Ciclo de Calvin. Os autores afirmam que um balanço adequado de Mg, irá fazer com que o bombeamento da enzima Rubisco ocorra de forma eficaz, e mais rápida, com maior afinidade pelo CO₂. Assim, o fornecimento de Mg para planta, mesmo em solo corrigido, é capaz de modular diferentes reações, aumentando a

atividade de várias enzimas incluindo a Rubisco, importantíssima para plantas de metabolismo C₃, e o reflexo obtido nesse trabalho prova que essa aplicação reflete no metabolismo de forma geral e na produtividade de grãos de soja (Tabelas 3, 4 e 5).

A coinoculação com o produto à base de *B. subtilis* e *B. megaterium* também foi interessante no incremento de pigmentos fotossintetizantes (SPAD), seja na aplicação via sulco ou sementes. *Bacillus* são bactérias capazes de auxiliar na solubilização de fósforo (P), além de auxiliarem como promotoras de crescimento. Com base nisso, estudos mostram que essas bactérias são capazes de formar endósporos, que podem suportar condições abióticas extremas como temperaturas elevadas, pH ácido e radiação (Bahadir *et al.* 2018). Isso viabiliza a utilização do produto, visto que o cenário atual de mudanças climáticas pode ser um potencializador do uso destas bactérias na mitigação dos estresses abióticos. Moretti *et al.* (2024), trabalhando com vários metabólitos bacterianos e coinoculação de RBPCs, verificaram que é necessário consorciar bactérias específicas quanto a funcionalidade para cultura. Os autores destacam ainda a necessidade de maiores pesquisas quanto a esses consórcios bacterianos e os resultados positivos em grupos específicos de bactérias quanto a fisiologia e produtividade das culturas.

Para o produto à base de *B. subtilis* e *B. megaterium*, Oliveira *et al.* (2020), trabalhando com a cultura do milho, constataram incremento de produtividade de 8,9% nas áreas que receberam o mix. Para soja, os autores verificaram um incremento de cerca de 12 a 16 sacas ha⁻¹ quando coinoculado *Bradyrhizobium* + *Bacillus*. O que justifica também a utilização para coinoculação do mix aliado com a pulverização do Mg foliar são as menores taxas do Perox constatada no PCA nesse estudo (Figuras 6 e 7).

Para os ureídeos, o tratamento com *B. japonicum* exclusivo (controle) apresentou superioridade em relação à coinoculação, pois a essa bactéria auxilia na FBN, e trabalhos com coinoculação mostram que resultados positivos e negativos podem aparecer dependendo da bactéria envolvida na coinoculação, tanto no metabolismo, bioquímica, tipo e quanto à forma de inoculação (via sulco ou sementes), o que pode afetar os parâmetros finais fisiológicos e produtividade (Nogueira *et al.* 2018; Prando *et al.* 2020). Ainda assim, o que essas pesquisas mostram é que coinocular apresenta resultados positivos e de ganhos produtivos dependendo do tipo de mistura de organismos, além de ser uma alternativa sustentável para suprir necessidades nutricionais das plantas.

Com um melhor balanço metabólico, a planta reflete isso em ganhos na produção. Para os dados de produtividade houve significativo papel no incremento de NVP e NGP, maiores

quando da coinoculação via sementes atrelado com aplicação do Mg foliar. De forma geral, foi observado em campo, que plantas que não receberam a pulverização de Mg e não foram coinoculadas, apresentaram maior quantidade de grãos não viáveis (vagens chochas), tal fato atribuído a oscilação térmica no período (Figura 2).

Para produtividade de grãos, a aplicação do Mg foliar foi capaz de aumentar consideravelmente o valor final. Também Altarugio *et al.* (2017), constataram em seu trabalho com soja e milho, que a aplicação foliar do Mg foi capaz de aumentar o índice SPAD da soja, além de componentes produtivos como vagens e massa de 100 grãos quando aplicado no período reprodutivo. Branquinho *et al.* (2017) verificaram que a aplicação de Mg nos estádios R₂-R₄ contribuiu no aumento dos componentes da produção e produtividade da soja. Nesse trabalho, com aplicação em V₆, os resultados mostraram-se adequados no incremento para os parâmetros fotossintéticos e produtivos da soja, vislumbrando efeito em aplicações mais precoces.

Além disso, em trabalho realizado por Cecatto Júnior *et al.* (2019 e 2021), com aplicação de Mg foliar em milho, foi observado que além de melhor estruturação visível nas plantas, houve aumento de massa seca de raízes e também massa seca da parte aérea. Segundo os autores, isso possibilitou maior ganho em termos de produtividade, haja vista a possibilidade de maior absorção de água, de outros nutrientes e também na interceptação da luz. Para este trabalho, é notório que a aplicação do Mg foliar em V₆ juntamente com a coinoculação via sementes é uma alternativa importante para o auxílio na mitigação do estresse térmico, o que pode auxiliar em ganhos produtivos.

Trabalhando com a cultura da soja, Deliboran *et al.* (2011), avaliando doses de Mg juntamente com fósforo, constataram que a aplicação foliar resultou em incremento de produtividade de 204 kg ha⁻¹ na menor dose (4 kg dal⁻¹), sendo possível atingir um incremento de 675 kg ha⁻¹ na maior dose (8 kg dal⁻¹). Esses autores também observaram que o teor de clorofila na folha foi maior com aumento das doses de magnésio, bem como a massa seca da parte aérea e das raízes. Nesse trabalho, o teor de clorofila nas folhas também foi superior em plantas que receberam a aplicação do Mg, e juntamente com os resultados de outros indicativos confirmam melhoria na fisiologia fotossintética.

Para coinoculação do mix de *Bacillus*, os resultados iniciais são promissores, mas carecem de mais pesquisas. Guimarães e Klein (2023), trabalhando com o mix de *Bacillus* em solo muito argiloso, com foco principal na adubação fosfatada, observaram que a aplicação de 100 mL do mix para 50 kg de sementes, associada a metade da dose recomendada de fertilização fosfatada,

foi capaz de aumentar a produtividade da soja. Em contraste, o trabalho em foco, que utilizou também a aplicação do Mg foliar, constatou que em solo com fertilidade corrigida, o mix de *Bacillus* em associação ao Mg, foi capaz de aumentar componentes produtivos e pode melhorar parâmetros fisiológicos importantes (Figuras 6 e 7). No caso, o estudo confirma o amplo espectro de ações que o mix pode vir a proporcionar para cultura da soja, viabilizando sua utilização.

Barea *et al.* (2015) e Chatterjee *et al.*, (2020) norteiam que vários fatores intermediam as relações entre bactérias e plantas, porém a compreensão dos mecanismos de ação e sinalizadoras da união bactéria/planta é indispensável para entender melhor as respostas vindas dessa interação. Os autores destacaram que, a liberação de moléculas que desencadeiam diferentes tipos de reações na planta deve ser melhor avaliado, além de que trabalhos com coinoculação de diferentes espécies e/ou estirpes de microrganismos podem desencadear respostas bioquímicas e fisiológicas interessantes, além de serem extremamente importantes para o desenvolvimento de uma agricultura eficaz e principalmente sustentável, com baixo custo.

7 CONCLUSÃO

O fornecimento de Mg foliar em V₆, mesmo em solo corrigido e com alto teor do nutriente, foi capaz de melhorar o metabolismo fotossintético das plantas de soja, o que refletiu em ganhos na produtividade de grãos. Para coinoculação do produto à base de *B. subtilis* e *B. megaterium* foi observado um incremento percentual de 11%, cerca de 6 sacas por ha⁻¹, mesmo em solo com fertilidade corrigida.

Mesmo em solos com fertilidade corrigida, a aplicação de Mg juntamente com a coinoculação via sementes de *B. subtilis* e *B. megaterium* mostrou-se eficaz no auxílio à planta para enfrentar o estresse térmico no campo, sendo que a aplicação de Mg promoveu o aumento considerável das taxas fotossintéticas (A), teor de clorofila e eficiência instantânea do uso da água (EIUA), com incremento no número de grãos e vagens por planta de soja, o que proporcionou maior produtividade de grãos. Esse efeito é particularmente relevante no contexto atual, tornando ainda mais necessários estudos adicionais para entender essas respostas em diferentes condições climáticas, sob diferentes tipos de fatores estressantes e solos.

REFERÊNCIAS

- ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant Cell and Environment**, Chichester, v. 24, p. 1337-1344, 2001.
- ALTARUGIO, L. M.; LOMAN, M. H.; NIRSCHL, M. G.; SILVANO, R. G.; ZAVASCHI, E.; CARNEIRO, L. M. S.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C.; OTTO, R. Yield performance of soybean and corn subjected to magnesium foliar spray. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 12, p. 1185-1191, 2017. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017001200007>.
- ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 252, p. 1-9, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024191913296>.
- ALVES, K. C. S. *Bacillus subtilis*: uma versátil ferramenta biotecnológica. **Scientia Amazonia**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 15-23, mar. 2018. Disponível em: <http://scientia-amazonia.org/wp-content/uploads/2018/05/v7-n2-b15-b23-2018.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2023.
- ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, 2011.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ARMANHI, J. S. L.; SOUZA, R. S. C.; BIAZOTTI, B. B.; YASSITEPE, J. E. C. T.; ARRUDA, P. Modulating drought stress response of maize by a synthetic bacterial community. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 12, p. 1-16, 21 out. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2021.747541>.
- BAHADIR, A.; CEYHAN, A.; GERGIN, O. O.; YALÇIN, B.; ÜLGER, M.; ÖZYAZGAN, T. M.; YAY, A. Protective effects of curcumin and beta-carotene on cisplatin-induced cardiotoxicity: an experimental rat model. **The Anatolian Journal of Cardiology**, Istanbul, v. 3, n. 19, p. 213-221, 2018. Kare Publishing. DOI: <http://dx.doi.org/10.14744/anatoljcardiol.2018.53059>.
- BÁRBARO, I. M.; BRANCALIÃO, S. R.; TICELLI, M.; MIGUEL, F. B.; SILVA, J. A. A. **Técnica alternativa**: coinoculação de soja com *Azospirillum* e *Bradyrhizobium* visando incremento de produtividade. [S. l.], 2008. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/20084/coinoculacao/index.htm>. Acesso em: 13 ago. 2024.
- BHAT, J. Y.; THIEULIN-PARDO, G.; HARTL, F. U.; HAYER-HARTL, M. Rubisco Activases: aaa⁺ chaperones adapted to enzyme repair. **Frontiers in Molecular Biosciences**, Lausanne, v. 4, p. 1-10, 10 abr. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fmolb.2017.00020>.

BIELESKI, R. L.; TURNER, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 17, p. 278-293, 1966. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(66\)90206-5](https://doi.org/10.1016/0003-2697(66)90206-5).

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 72, p. 248-254, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3).

BRANQUINHO, I. **Época de aplicação foliar de K e Mg na cultura da soja e seus efeitos nos teores de óleo, proteína e produtividade**. 2020. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2020.

BROETTO, F.; GOMES, E. R.; JOCA, T. A. C. **O estresse das plantas: teoria e prática**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017. 194 p.

Cakmak I.; Magnesium in crop production, food quality and human health. **Plant and Soil**, Dordrecht, 368:01-04, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1781-2>.

CAKMAK, I.; HORST, W. J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v. 83, p. 463-468, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1991.tb00121.x>.

CAMPO, R.J.; HUNGRIA, M. Protocolo para análise da qualidade e da eficiência agrônômica de inoculantes, estirpes e outras tecnologias relacionadas ao processo de fixação biológica do nitrogênio em leguminosas. In: REUNIÃO DA REDE DE LABORATÓRIOS PARA RECOMENDAÇÃO, PADRONIZAÇÃO E DIFUSÃO DE TECNOLOGIAS DE INOCULANTES DE INTERESSE AGRÍCOLA, 13., 2006, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. p.89-123. (Embrapa Soja. Documentos, 290).

CECATTO JÚNIOR, R.; GUIMARÃES, V. F.; BRITO, T. S.; SILVA, A. S. L.; SUSS, A. D.; ANKLAN, M. A.; INIGAKI, A. M. Fertilização de sulfato de magnésio na cultura do milho submetido à inoculação de bactérias promotoras de crescimento vegetal. **Cultivando o Saber**, [s. l.], v. 14, p. 53-64, 2021.

CECATTO JÚNIOR, R.; GUIMARÃES, V. F.; BULEGON, L. G.; SUSS, A. D.; BAZEI, G. L.; BRITO, T. S.; INIGAKI, A. M. Inoculation of maize seeds with *Azospirillum* and magnesium through foliar application to enhance productive performance. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 11, n. 14, p. 225-233, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n14p225>.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Brasil). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Previsão Numérica de Tempo por Período**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/previsao-tempo/ms/selviria>. Acesso em: 08 mar. 2024.

CHAKRABORTY, U.; CHAKRABORTY, B.; DEY, P.; CHAKRABORTY, A. P. Role of microorganisms in alleviation of abiotic stresses for sustainable agriculture. In: CHAKRABORTY, U.; CHAKRABORTY, B. (ed.). **Abiotic stresses in crop plants**. Wallingford: CABI, 2015. p. 232-253. DOI: <https://doi.org/10.1079/9781780643731.0232>.

CHATTERJEE, A.; SHANKAR, A.; SINGH, S.; KESARI, V.; RAI, R.; PATEL, K. A.; RAI, L.C. Beneficial microorganisms and abiotic stress tolerance in plants. *In*: HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; FUJITA, M.; OKU, H.; ISLAM, T. (ed.).

Approaches for enhancing abiotic stress tolerance in plants. Boca Raton: CRC Press, 2020. p. 473-502. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351104722>.

CHEN, J.; LI, Y.; WEN, S.; ROSANOFF, A.; YANG, G.; SUN, X. Magnesium Fertilizer-Induced Increase of Symbiotic Microorganisms Improves Forage Growth and Quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [S.l.], v. 65, n. 16, p. 3253-3258, 12 abr. 2017. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05764>.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Safra brasileira de grãos.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/gaos>. Acesso em: 15 set. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Safra brasileira de grãos.** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/gaos>. Acesso em: 20 ago. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Brasil deve produzir maior safra histórica de grãos no ciclo 2022/2023, com 317,6 milhões de toneladas.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5074-brasil-deve-produzir-maior-safra-historica-de-graos-no-ciclo-2022-2023>. Acesso em: 18 set. 2023.

DELIBORAN, A.; SAKIN, E.; ASLAN, H.; MERMUT, A. Effects of different water, phosphorus and magnesium doses on the quality and yield factors of soybean (*Glycine max* L.) in Harran plain conditions. **International Journal of Physical Sciences**, Sapele, v. 6, n. 6, p. 1484-1495, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5897/IJPS11.266>.

DUCA, D. R.; GLICK, B. R. Indole-3-acetic acid biosynthesis and its regulation in plant-associated bacteria. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Secaucus, v. 104, p. 8607-8619, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10869-5>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Plano diretor.** Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor>. Acesso em: 17 set. 2023.

EMPRESA DE SANEAMENTO DE MATO GROSSO DO SUL – SANESUL (org.). **Modelagem técnica estudos de engenharia, ambiental e social:** caracterização geral do município. Campo Grande: Governo de Mato Grosso do Sul, 2022. Disponível em: <http://www.epe.segov.ms.gov.br/wp-content/uploads/2020/01/61.-Selviria.pdf>. Acesso em: 17 set. 2023.

FERLINI, H. A. **Co-inoculación en soja (*Glycine max*) com *Bradyrhizobium japonicum* y *Azospirillum brasilense*.** Villa Clara-CUB: Engormix/Agricultura-Artículos técnicos, 2006. 2 p. (Documento 01).

FURMAN, F. G. **Desenvolvimento e produtividade do trigo em função da inoculação de bactérias promotoras do crescimento vegetal.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

GALDIANO JÚNIOR, R. F. **Isolamento, identificação e inoculação de bactérias produtoras de auxinas associadas às raízes de orquídeas**. 2009. 67f. (Dissertação de Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

GUIMARÃES, V. F.; KLEIN, J. Inoculante líquido contendo *Bacillus megaterium* e *Bacillus subtilis* é eficiente em promover crescimento e disponibilizar fósforo para a soja. **Desarrollo Local Sostenible**, Heidelberg, v. 16, n. 46, p. 2029-2060, 4 set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.55905/rdelosv16.n46-006>.

GUPTA, G.; PARIHAR, S. S.; AHIRWAR, N. K.; SNEHI, S. K.; SINGH, V. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): current and future prospects for development of sustainable agriculture. **Microbial and Biochemical Technology**, Uxbridge, v. 7, n. 2, p. 96-102, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4172/1948-5948.1000188>.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S.; MAHMUD, J.; FUJITA, M.; FOTOPOULOS, V. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. **Antioxidants**, Basel, v. 9, n. 8, p. 681, 29 jul. 2020. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/antiox9080681>.

HIRAKUR, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: Embrapa, 2014. Disponível em: <https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/990000/1/Oagronegociodasojanoscontextosmundialebrasileiro.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2023.

HISCOX, J.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. **Botany**, Ottawa, v. 57, p. 1332-1334, 1979. DOI: <https://doi.org/10.1139/b79-163>.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja**: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 80 p. (Embrapa Soja. Documentos, 283).

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. Brasília, DF: Embrapa, 2001. 48 p. (Circular Técnica, 35).

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, 2019. p. 50-62. (Fundação MT. Boletim, 19).

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Co-Inoculation of Soybeans and Common Beans with *Rhizobia* and *Azospirillum*: strategies to Improve Sustainability. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 49, n. 1, p. 791-801, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-012-0771-5>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Banco estatístico de dados**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/ipca15/brasil>. Acesso em: 15 set. 2023.

KUMAR, T.; VERINDER, W.; PIYUSH, P.; DUBEY, R. C.; MAHESHWARI, D. K. Rhizosphere competent *Pseudomonas aeruginosa* in the management of *Heterodera cajani* on sesame. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 25, p. 277–285, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9890-4>.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2006. p. 295-338.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.

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

MARTINEAU, E.; DOMEQ, J. C.; BOSC, A.; DENOROY, P.; FANDINO, V. A.; LAVRES JR, J.; JORDAN-MEILLE, L. The effects of potassium nutrition on water use in field-grown maize (*Zea mays* L.). **Environmental and Experimental Botany**, Ottawa, v. 134, p. 62- 71, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.004>.

MEHLA, J.; CAUFIELD, J.H.; SAKHAWALKAR, N.; UETZ, P. A Comparison of two-hybrid approaches for detecting protein–protein interactions. **Methods in Enzymology**, San Diego, p. 333-358, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/bs.mie.2016.10.020>.

MELO, I. S. **Rizobactérias**. Jaguariuna: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meioambiente/manejo/controlealternativo/rizobacterias#:~:text=Rizobact%C3%A9rias%20competem%20por%20nutrientes%20e%20elementos%20essenciais%20no,produzem%20sider%C3%B3foros%2C%20diferindo%2C%20contudo%2C%20na%20efici%C3%Aancia%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 28 ago. 2023.

MENDOZA, M. P.; ESPINOSA, V. D.; MANCERA, H. A. Z. Estudio de metabolitos producidos por bacterias que solubilizan fosfato aislado de la raíz y rizoplasma de gramíneas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 4944-4949, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n4-012>.

MÓGOR, Á. F.; BARBIZAN, T.; PAULETTI, V.; OLIVEIRA, J. de; BETTONI, M. M. Teores de clorofila em cultivares de tomateiro submetidas a aplicações foliares de magnésio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia v. 43, n. 4, p. 363-369, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <https://doi.org/10.1590/s1983-40632013000400008>.

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**, London, v. 19, n. 1, p. 1-15, 19 jul. 2024. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40793-024-00595-0>.

MUNDO ECOLOGIA (org.). **Classificação Botânica da Soja, Fisiologia e Morfologia**. [S.l.], 2019. Disponível em: https://www.mundoecologia.com.br/plantas/classificacao-botanica-da-soja-fisiologia-e-morfologia/#google_vignette. Acesso em: 24 ago. 2023.

NAS, Y.; ZENGİN, S. K. Agronomic, Biochemical, and Physiological Responses to Magnesium (Mg) Application in Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under Greenhouse Conditions. **Horticulturae**, Basel, v. 10, n. 10, p. 1034, 29 set. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/horticulturae10101034>.

NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N. **Características da Soja**. Londrina: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da-soja>. Acesso em: 24 ago. 2023.

NOGUEIRA M A.; PRANDO, A. M.; OLIVEIRA, A. B.; LIMA, D.; CONTE, O.; HARGER, N.; OLIVEIRA, F. T.; HUNGRIA, M. **Ações de transferência de tecnologia em inoculação/coinoculação com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* na cultura da soja na safra 2017/18 no estado do Paraná**. EMBRAPA: Londrina, 2018. Circular Técnica 143, ISSN 2176-2864. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1095314/1/CT143OL.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2024.

OLIVEIRA, A. M. R.; BANGEL, E. V.; HUNGRIA, M.; SILVEIRA, J. R. P.; VARGAS, L.K.; LISBOA, B. B. Caracterização da região espaçadora 16-235 rDNA para diferenciação de estirpes de rizóbios utilizadas na produção de inoculantes comerciais no Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 8, p. 1423-1429, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000800015>.

OLIVEIRA, C. A.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; COTA, L. V.; SANTOS, F. C.; TINOCO, S. M. S.; LANA, U. G. P.; OLIVEIRA, M. C.; MATTOS, B. B.; ALVES, V. M. C.; RIBEIRO, V. P.; VASCO JÚNIOR, R. **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho**. EMBRAPA: Sete Lagoas, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1120362/1/Circ-Tec.-260.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **ONU confirma que 2023 bate recorde de temperatura global**. Brasília, DF, 2024. World Meteorological Organization. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/257750-onu-confirma-que-2023-bate-recorde-de-temperatura-global>. Acesso em: 03 dez. 2024.

PARRY, M. A.; KEYS, A. J.; MADGWICK, P. J.; CARMO-SILVA, A. E.; ANDRALOJC, P. J. Rubisco regulation: a role for inhibitors. **Journal of Experimental Botany**, Ottawa, v. 59, p. 1569-1580, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/ern084>.

PENG, W. T.; ZHANG, L. D.; ZHOU, Z.; FU, C.; CHEN, Z. C.; LIAO, H. Magnesium promotes root nodulation through facilitation of carbohydrate allocation in soybean. **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v. 163, n. 3, p. 372-385, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/ppl.12730>.

PIPOLO, A. E.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; MANDARINO, J. M. G. **Teores de óleo e proteína em soja: fatores envolvidos e qualidade para a indústria**. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 15 p. Comunicado Técnico, 86.

PORTIS, A. R.; HELDT, H. W. Light-dependent changes of the Mg^{2+} concentration in the stroma in relation to the Mg^{2+} dependency of CO_2 fixation in intact chloroplasts. **Biochimica Et Biophysica Acta (Bba) - Bioenergetics**, Amsterdam, v. 449, n. 3, p. 434-446, dez. 1976. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0005-2728\(76\)90154-7](http://dx.doi.org/10.1016/0005-2728(76)90154-7).

POUDEL, M.; MENDES, R.; COSTA, L. A. S.; BUENO, C. G.; MENG, Y.; FOLIMONOVA, S. Y.; GARRETT, K. A.; MARTINS, S. J. The role of plant-associated bacteria, fungi, and viruses in drought stress mitigation. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 12, p. 1-21, 25 out. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2021.743512>.

PRANDO, A. M.; OLIVEIRA, A. B.; LIMA, D.; POSSAMAI, E. J.; REIS, E. A.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M.; CONTE, O. **Coinoculação da soja com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum* na safra 2019/2020 no Paraná**. Londrina: Embrapa, 2020. Circular Técnica 166, ISSN 2176-2864. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1129470/1/Circ-Tec-166.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2024.

PRETTY, J.; BHARUCHA, Z. P. Sustainable intensification in agricultural systems. **Annals Of Botany**, Oxford, v. 114, n. 8, p. 1571-1596, 28 out. 2014. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcu205>.

QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; ROSOLEM, C. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Soja. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATOS JÚNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; VAN RAIJ, B. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 2022. p. 209-212.

RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Instituto Agrônomo: Campinas, 2001. 284 p.

REIS, A. R. dos; LISBOA, L. A. M.; REIS, H. P. G.; BARCELOS, J. P. Q.; SANTOS, E. F.; SANTINI, J. M. K.; MEYER-SAND, B. R. V.; PUTTI, F. F.; GALINDO, F. S.; KANEKO, F. H. Depicting the physiological and ultrastructural responses of soybean plants to al stress conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, Issy les Moulineaux, v. 130, p. 377-390, set. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.028>.

RIBEIRO, V. P.; MARRIEL, I. E.; SOUSA, S. M.; LANA, U. G. P.; MATTOS, B. B.; OLIVEIRA, C. A.; GOMES, E. A. Endophytic *Bacillus* strains enhance pearl millet growth and nutrient uptake under low-P. **Brazilian Journal of Microbiology**, [s.l.], v. 49, p. 40-46, nov. 2018. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2018.06.005>.

RODRIGUES, V. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; BOSSOLANI, J. W.; MORETTI, L. G.; PORTUGAL, J. R.; MUNDT, T. T.; OLIVEIRA, S. L.; GARCIA, A.; CALONEGO, J. C.; LOLLATO, R. P. Magnesium Foliar Supplementation Increases Grain Yield of Soybean and Maize by Improving Photosynthetic Carbon Metabolism and Antioxidant Metabolism. **Plants**,

Basel, v. 10, n. 4, p. 797, 19 abr. 2021. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/plants10040797>.

ROSOLEM, Ciro. **Recomendação e aplicação de nutrientes via foliar**. Lavras: Ufla, 2002. Disponível em:

https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dcs.ufla.br/images/imagens_dcs/pdf/Prof_Faquim/Recomendacao%20e%20aplicacao%20de%20nutrientes%20VIA%20FOLIAR%20Parte%201%20.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. E-book: il. color. E-book, no formato ePub, convertido do livro impresso. Disponível em:

<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN-9788570358172.epub>. Acesso em: 16 ago. 2024.

SANTOS, J. C. F.; DEBIASI, H. **Rotação de culturas**. Londrina: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/producao/manejo-do-solo/rotacao-de-culturas>. Acesso em: 26 ago. 2023.

SILVA, A. O. **Fenologia da soja aplicada no dia a dia**. [S.l.], 2023. Disponível em:

<https://agroadvance.com.br/blog-fenologia-da-soja/#:~:text=A%20fenologia%20da%20soja%20%C3%A9%20o%20estudo%20do,condi%C3%A7%C3%B5es%20ambientais%20e%20%C3%A0s%20pr%C3%A1ticas%20de%20manejo%20empregadas..> Acesso em: 25 ago. 2023.

SILVA, E. M. **Tudo o que você precisa saber sobre plantio direto**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/plantio-direto/>. Acesso em: 26 ago. 2023.

SILVA, I. R. D.; MENDONÇA, E. D. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; VICTOR, H. A. V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI NEVES, J. C. L. (ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SINGH, S. A review on possible elicitor molecules of cyanobacteria: Their role in improving plant growth and providing tolerance against biotic or abiotic stress. **Journal of Applied Microbiology**, Chichester, v. 117, n. 5, p. 1221-1244, Nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.12612>.

SOUTO, L. A. **Microrganismos solubilizadores de fosfato: Usos e potencialidades na agricultura**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo. 2020.

SWIFT, R. S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society American, 1996. p.1011-1020. (SSA book series, 5).

TAHA, R. S.; MAHDI, A. H.A.; EL-RAHMAN, H. A. A. Effect of biofertilizers as a partial substitute for mineral fertilizers on growth, anatomical structure, mineral elements and yield of wheat under newly reclaimed soil conditions. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, Kancheepuram, v. 5, n. 8, p. 458-469, 10 ago. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2016.508.049>.

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

TAVARES, L. C. V. **Transferência de tecnologia**. Londrina: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/transferencia-de-tecnologia>. Acesso em: 25 ago. 2023.

TRÄNKNER, M., JÁKLI, B., TAVAKOL, E., GEILFUS, C. M., CAKMAK, I., DITTERT, K., & SENBAYRAM, M. Magnesium deficiency decreases biomass water-use efficiency and increases leaf water-use efficiency and oxidative stress in barley plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 406, n. 1, p. 409-423, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2886-1>.

TRENTIN, R.; HELDWEIN, A. B.; STRECK, N. A.; TRENTIN, G.; SILVA, J. **C. Subperíodos fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura**. Santa Maria: Embrapa, 2013. Disponível em: <https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/91502/1/48n07a02.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2023.

VOGELS, G.D.; VAN DER DRIFT, C. Differential analysis of glyphosate derivatives. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 33, p. 143-157. 1970.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Philadelphia, v. 37, p. 29-38, 1934.

WANG, Z.; HASSAN, M. U.; NADEEM, F.; WU, L.; ZHANG, F.; LI, X. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 10, p. 1-10, 24 jan. 2020. Frontiers Media SA. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>.

YEMM, E.M.; COCKING, E.C. Estimation of amino acids by ninhydrin. **Analyst**, London, v. 80, p. 209-213, 1955.

ZILLI, J.E.; MARSON, L.C.; MARSON, B.F.; CAMPO, R.J.; HUNGRIA, M. Inoculação de Bradyrhizobium em soja por pulverização em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 541-544, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400014>.

ZOLLA, G.; BAKKER, M. G.; BADRI, D. V.; CHAPARRO, J. M.; SHEFLIN, A. M.; MANTER, D. K.; VIVANCO, J. Understanding root-microbiome interactions. In: BRUIJN, F. J. (ed.). **Molecular microbial ecology of the rhizosphere**. Hoboken: Wiley, 2013. v. 2, p. 745-754. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118297674.ch7>.