

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

USO DE BACTÉRIAS ATENUADORAS DE ESTRESSE CAUSADO
POR IMAZAPIQUE NO AMENDOIM

João Francisco Damião Zanqueta

JABOTICABAL

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

USO DE BACTÉRIAS ATENUADORAS DE ESTRESSE CAUSADO POR
IMAZAPIQUE NO AMENDOIM

João Francisco Damião Zanqueta

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luís da C.
A. Alves

Coorientador: Dr. Heytor Lemos Martins

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus
de Jaboticabal, como parte das exigências
para Graduação em Engenharia
Agrônômica.

JABOTICABAL- SP

1º semestre/2026

Z33u

Zanqueta, João Francisco Damião

Uso de bactérias atenuadoras de estresse causado por imazapique no amendoim / João Francisco Damião Zanqueta. -- Jaboticabal, 2026
48 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Pedro Luís da Costa Aguiar Alves

Coorientador: Heytor Lemos Martins

1. *Arachis hypogea*. 2. Bactérias. 3. Herbicidas. 4. Promoção de crescimento. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Jaboticabal
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias



AUTOR

JOÃO FRANCISCO DAMIÃO ZANQUETA

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO

**USO DE BACTÉRIAS ATENUADORAS DE ESTRESSE CAUSADO POR IMAZAPIQUE
NO AMENDOIM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves

Coorientadores: Dr. Heytor Lemos Martins
Eng. Agr. Arthur Nardi Campalle

Área de Concentração: Agronomia

Data da defesa: 19/06/2026

(x) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:

Dr. Heytor Lemos Martins

Pós-Doutorando em Agronomia (Produção Vegetal) – FCAV/UNESP

Prof. Dr. Rodrigo Ney Millan

Professor da Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG/Frutal

Eng. Agr. Carlos Manuel Burgos de La Cruz

Mestrando em Agronomia (Produção Vegetal) – FCAV/UNESP

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 08/07/2026

Prof. Dr. Eduardo Custódio Gasparino
Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou em mim e me deu forças para seguir em frente. Vocês são minha maior inspiração e o alicerce de todas as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Sérgio e Simone, e ao meu irmão, Luiz Otávio, por serem meus maiores exemplos de amor, dedicação e perseverança, e por sempre me incentivarem a acreditar e lutar pelos meus sonhos. Agradeço por todo o amor, apoio e força que me ofereceram em cada etapa da minha vida, pelos ensinamentos que moldaram quem sou e por estarem ao meu lado em todos os momentos. Esta conquista também é de vocês. Recebam todo o meu amor e minha eterna gratidão, pois sem vocês nada disso seria possível.

À minha namorada, Júlia, por estar ao meu lado durante toda esta caminhada, compartilhando comigo os momentos de alegria e os desafios. Obrigado pelo carinho, pela compreensão, pela paciência e pelo incentivo constante, especialmente nos momentos em que mais precisei. Seu apoio foi essencial para que eu pudesse seguir em frente e concluir mais esta etapa da minha vida. Levo comigo toda a gratidão pelo amor e pela parceria que tornaram esta jornada mais leve e feliz.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves, minha sincera gratidão por todas as oportunidades, pela confiança depositada em mim, pela paciência, pelos ensinamentos e pelo apoio durante toda a minha formação. Mais do que um excelente pesquisador, agradeço o exemplo de humildade, generosidade e humanidade, qualidades que sempre levarei como inspiração. Receba minha mais profunda admiração, respeito e gratidão.

À Profa. Dra. Eliana Gertrudes de Macedo, minha sincera gratidão pela orientação durante o período de iniciação científica, pela confiança depositada em meu trabalho, pelos valiosos ensinamentos e por todo o incentivo ao longo dessa trajetória. Sua dedicação e compromisso com a formação de seus alunos contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao meu coorientador, Dr. Heytor Lemos Martins, agradeço a parceria, disponibilidade e dedicação ao longo deste trabalho. Sou grato pelos valiosos ensinamentos, pela paciência em cada etapa da pesquisa e pelo constante incentivo, fundamentais para que eu alcançasse este objetivo. Levo comigo, além do aprendizado, a amizade construída durante essa caminhada, da qual muito me orgulho e que certamente levarei para toda a vida.

À família LAPDA, por ter sido o alicerce desta trajetória acadêmica. Agradeço por todo o apoio, pelos conhecimentos compartilhados, pela amizade, pelas experiências

vividas e por cada momento de aprendizado. Tenho imensa gratidão por fazer parte dessa equipe, que contribuiu de forma significativa para minha formação como pesquisador e como pessoa.

À República Litrasso, minha sincera gratidão por ter sido meu lar durante cinco anos. Mais do que uma casa, encontrei uma família, onde vivi momentos que marcaram profundamente minha vida. Agradeço por cada amizade construída, pelos ensinamentos, pelo companheirismo e por todas as histórias compartilhadas. Levo comigo lembranças que jamais serão apagadas e a certeza de que uma parte de quem sou hoje foi construída entre essas paredes. Muito obrigado por fazerem parte da minha história.

A Deus, por me conceder saúde, sabedoria e perseverança para enfrentar cada desafio desta jornada. Sou grato por sua presença constante em minha vida e por me permitir alcançar mais esta importante conquista.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de crescimento bacteriano	17
Figura 2. Gráficos das variáveis biométricas de plantas de amendoim no estágio vegetativo em solo arenoso.....	21
Figura 3. PCA das variáveis biométricas no estágio vegetativo em solo arenoso.	23
Figura 4. Análise de agrupamento hierárquico (Cluster) no estágio vegetativo em solo arenoso.	24
Figura 5. Gráficos das variáveis biométricas do amendoim no estágio reprodutivo em solo arenoso	26
Figura 6. Teores de malondialdeído (MDA) em plantas de amendoim cultivadas em solo arenoso.	28
Figura 7. Gráfico das variáveis biométricas do amendoim no estágio vegetativo em solo argiloso.	30
Figura 8. PCA das variáveis biométricas no estágio vegetativo em solo argiloso.	31
Figura 9. Análise de agrupamento hierárquico (Cluster) no estágio vegetativo em solo argiloso.	32
Figura 10. Gráficos das variáveis biométricas do amendoim no estágio reprodutivo em solo argiloso.....	35
Figura 11. Teores de malondialdeído (MDA) em plantas de amendoim cultivadas em solo argiloso.....	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Aspectos gerais do amendoim	10
2.2 Controle de plantas daninhas na cultura do amendoim	11
2.3 Uso de herbicidas na cultura do amendoim	12
2.4 Utilização de bioinsumos no amendoim.....	13
2.5 Estirpes bacterianas	13
3 HIPÓTESES	14
4 OBJETIVOS.....	14
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
5.1 Área de estudo	14
5.2 Curva de crescimento e unidades formadoras de colônias	15
5.3 Inoculação das sementes.....	17
5.4 Aplicação do imazapique.....	18
5.5 Avaliações biométricas do amendoim.....	18
5.6 Avaliações bioquímicas na planta	19
6 RESULTADOS	20
6.1 Solo arenoso	20
6.1.1 Estádio vegetativo	20
6.1.2 Estádio reprodutiva.....	25
6.1.3 Análises MDA estágio vegetativo	28
6.2 Solo argiloso	29
6.2.1 Estádio vegetativo	29
6.2.2 Estádio reprodutivo	33
6.2.3 Análises MDA	35
7 DISCUSSÃO	37
8 CONCLUSÃO.....	41
9 REFERÊNCIAS	42

USO DE BACTÉRIAS ATENUADORAS DE ESTRESSE CAUSADO POR IMAZAPIQUE NO AMENDOIM

RESUMO

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) representa uma cultura de elevada importância econômica global, cujo manejo fitossanitário envolve o uso frequente do herbicida imazapique, que, mesmo registrado para a cultura, pode induzir efeitos fitotóxicos que comprometem o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das plantas. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou avaliar se a inoculação com *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata* contribui para a atenuação do estresse causado pelo herbicida imazapique no amendoim. Foram conduzidos dois experimentos em vasos de 20 L, instalados em área experimental da UNESP/FCAV, em Jaboticabal-SP, em delineamento de blocos casualizados com esquema fatorial 3×2, envolvendo três tratamentos bacterianos (*B. inaquosorum*, *B. lata* e controle sem inoculação) e duas condições de herbicida (com e sem aplicação de imazapique), em solo argiloso e solo arenoso. As sementes foram inoculadas em sulco com inóculo a 10^8 UFC mL⁻¹ e, após a emergência das plântulas, realizou-se a aplicação do imazapique. Foram avaliadas variáveis biométricas nos estádios vegetativo e reprodutivo, além da peroxidação lipídica por meio do teor de malondialdeído (MDA), com análise estatística pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e análises multivariadas por PCA e agrupamento hierárquico. No solo arenoso, os tratamentos inoculados mantiveram maior comprimento da parte aérea e radicular das plantas de amendoim sob aplicação do herbicida, ao passo que *B. lata* não proporcionou redução significativa no comprimento de raiz entre as condições de herbicida. No solo argiloso com *B. lata*, as plantas de amendoim destacaram-se em comprimento da parte aérea, área foliar e massa seca de folhas, enquanto plantas com ambas as bactérias superaram o controle no comprimento radicular na presença do herbicida. Em ambos os solos, os tratamentos inoculados não causaram variação significativa nos teores de MDA entre as condições de herbicida, ao contrário do controle, que exibiu elevação do marcador oxidativo com a aplicação do imazapique. Concluiu-se que *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata* atenuaram o estresse fitotóxico induzido pelo imazapique em plantas de amendoim, reduzindo os danos oxidativos e preservando o crescimento vegetal, com respostas diferenciadas em função do tipo de solo, configurando-se como estratégia complementar ao manejo químico da cultura.

Palavras-chave: *Arachis hypogaea*; herbicida; estresse oxidativo; bioinsumos.

ABSTRACT

Peanut (*Arachis hypogaea* L.) is a crop of high global economic importance, whose phytosanitary management frequently involves the use of the herbicide imazapic. Although registered for the crop, imazapic may induce phytotoxic effects that impair vegetative and reproductive development. In this context, the present study aimed to evaluate whether inoculation with *Bacillus inaquosorum* and *Burkholderia lata* contributes to the mitigation of stress caused by imazapic in peanut plants. Two experiments were conducted in 20 L pots at UNESP/FCAV, Jaboticabal, São Paulo State, Brazil, under a randomized block design in a 3×2 factorial scheme, involving three bacterial treatments (*B. inaquosorum*, *B. lata*, and a non-inoculated control) and two herbicide conditions (with and without imazapic application), in clayey and sandy soils. Seeds were inoculated in the sowing furrow (10^8 CFU mL⁻¹) and, after seedling emergence, imazapic was applied. Biometric variables were evaluated at vegetative and reproductive stages, along with lipid peroxidation (MDA content). Statistical analysis was performed using Tukey's test ($p < 0.05$) and multivariate analyses (PCA and hierarchical clustering). In sandy soil, inoculated treatments maintained greater shoot and root length under herbicide application, whereas *B. lata* showed no significant reduction in root length between herbicide conditions. In clayey soil, *B. lata* stood out in shoot length, leaf area, and leaf dry mass, while both bacteria surpassed the control in root length under herbicide stress. In both soils, inoculated treatments prevented significant variation in MDA contents between herbicide conditions, unlike the control, which exhibited increased oxidative damage with imazapic. It was concluded that *Bacillus inaquosorum* and *Burkholderia lata* mitigate imazapic-induced phytotoxic stress in peanut plants by reducing oxidative damage and preserving growth, with responses varying by soil type, thus constituting a complementary strategy for the chemical management of the crop.

Keywords: *Arachis hypogaea*; herbicide; oxidative stress; bioinputs.

1 INTRODUÇÃO

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.), nativo da América do Sul, é uma cultura de grande relevância econômica e alimentar mundialmente, sendo consumido tanto *in natura* quanto processado para obtenção de óleo, farelo e diversos produtos alimentícios, além de ter aplicações na indústria farmacêutica e na produção de biodiesel. A liderança na produção mundial cabe à China, seguida pela Índia, Nigéria e Estados Unidos. No Brasil, o cultivo concentra-se principalmente no estado de São Paulo, especialmente na região da Alta Mogiana, onde o amendoim integra esquemas de rotação de culturas, incluindo a renovação de canaviais, contribuindo para o aumento da produtividade após o declínio observado na década de 1970 (Godoy *et al.*, 2017, 2018; CONAB, 2022).

Assim como em outras culturas, o amendoim está sujeito à infestação de plantas daninhas (Dias *et al.*, 2009; Seale *et al.*, 2021; Mekdad *et al.*, 2021), com perdas de produtividade que podem variar de 23 a 92%. O controle químico é o método mais empregado no manejo dessas espécies, em razão da sua elevada eficiência operacional, rapidez de ação e viabilidade econômica (Alvino *et al.*, 2011). Entretanto, são poucos os herbicidas registrados pelo MAPA para aplicação em pós-emergência na cultura, dentre os quais se destacam imazapique, imazetapir, bentazona + imazamox, cletodim e quizalofop-e-p-etílico (AGROFIT, 2024), sendo o imazapique amplamente utilizado no manejo de plantas daninhas na cultura (Zanardo *et al.*, 2018; Price *et al.*, 2021).

O imazapique, apesar de apresentar seletividade à cultura do amendoim, ainda pode ocasionar efeitos fitotóxicos, mesmo que leves, afetando o desenvolvimento das plantas e interferindo na produtividade (Zanardo *et al.*, 2018; Price *et al.*, 2021; Simarmata *et al.*, 2023; Daramola *et al.*, 2024). Diante disso, surge a possibilidade de utilização de agentes biológicos capazes de atenuar esses efeitos por meio da simbiose com as plantas e da metabolização das moléculas herbicidas (Dai *et al.*, 2019; Radwan *et al.*, 2019; Saha *et al.*, 2016).

O amendoim apresenta capacidade de estabelecer simbiose com microrganismos (Oliveira-Paiva *et al.*, 2022), que desempenham papel fundamental na promoção do crescimento vegetal e no fornecimento de nutrientes essenciais. A cultura também possui capacidade de fixar nitrogênio atmosférico em associação com bactérias do gênero *Rhizobium*, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados e contribuindo para a sustentabilidade agrícola (Oliveira-Paiva *et al.*, 2022; Nannipieri *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Camargo *et al.*, 2022).

Microrganismos, como bactérias e fungos, podem estabelecer relações benéficas com as plantas, destacando-se a mobilização de nutrientes, a fixação biológica de nitrogênio, a solubilização de fósforo e potássio, a produção de fitormônios, a proteção contra fitopatógenos e a atenuação dos efeitos fitotóxicos de herbicidas (Simarmata *et al.*, 2023). Também contribuem para aumentar a tolerância a condições abióticas adversas, como seca e salinidade, tornando a rizosfera um ambiente estratégico para o estabelecimento dessas interações (Gomes *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017; Da Silva *et al.*, 2022).

Entretanto, há escassez de informações sobre a comunidade microbiológica associada ao cultivo do amendoim e sobre espécies com potencial de inoculação visando à melhoria do desenvolvimento da cultura e à atenuação de estresses principalmente os causados por herbicidas. Atualmente, apenas uma estirpe é regulamentada para uso comercial na cultura — a SEMIA 6144, recomendada exclusivamente para auxiliar na nodulação. Dessa forma, tornam-se necessários estudos envolvendo novos isolados microbianos capazes de atuar na mitigação de estresses causados por agroquímicos, como o imazapique, ampliando as possibilidades de manejo sustentável da cultura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais do amendoim

O amendoim (*A. hypogaea*) é uma leguminosa, pertencente à família Fabaceae. Nativo da América do Sul é uma das oleaginosas mais cultivadas em todo o mundo. É uma planta herbácea, ereta ou prostrada, com ciclo anual indeterminado (Gregory; Krapovickas, 1980). Além da classificação botânica, há uma nomenclatura agrônômica e comercial que separa os cultivares em três grupos de acordo com as características morfológicas e reprodutivas (Sholar; Mozing; Beasley Jr, 1995). Os grupos são classificados como, Valência, Virginia e Spanish, e apresentam as seguintes diferenças vegetativas e reprodutivas: hábito de crescimento (ereto, semiereto ou rasteiro), tipo de ramificação, duração do ciclo, tamanho das sementes, número de vagens por planta e de sementes por vagem, entre outros (Nakagawa; Rosolem, 2011). O gênero *Arachis* L. é composto por 81 espécies nativas de diferentes lugares da América do Sul, principalmente, Brasil, Bolívia, Paraguai, Argentina e Uruguai (Krapovickas; Gregory, 1994; Valls; Simpson, 2005).

Este grão versátil é consumido tanto *in natura* quanto processado para a obtenção de óleo, farelo e diversos produtos alimentícios. Além disso, é empregado na indústria

farmacêutica e na produção de biodiesel. Entre as principais oleaginosas cultivadas, o amendoim ocupa o quarto lugar em nível mundial, perdendo apenas para a soja, colza (canola) e girassol (USDA, 2025). A liderança na produção mundial cabe à China, seguida pela Índia, Nigéria e Estados Unidos.

No Brasil, o amendoim adapta-se a uma variedade de condições climáticas, com uma área colhida em 2024 de 281.563 hectares (IBGE, 2024). Com cultivo concentrado principalmente no estado de São Paulo, especialmente na região de Ribeirão Preto (Alta Mogiana). Nessa região, o amendoim é integrado a esquemas de rotação de culturas, incluindo a renovação de canaviais. Essa integração tem contribuído para aumentar a produtividade, após um declínio nas décadas de 70, quando as plantações de soja substituíram áreas de cultivo de amendoim (Godoy *et al.*, 2017, 2018; Costa *et al.*, 2017; CONAB, 2022).

2.2 Controle de plantas daninhas na cultura do amendoim

Dentre os diversos fatores que podem comprometer a produtividade da cultura do amendoim destaca-se a interferência das plantas daninhas. A ocorrência de uma elevada população de plantas daninhas, sobretudo no início do desenvolvimento da cultura, pode proporcionar perda acentuada da produtividade se o controle não for realizado de forma adequada e no momento certo. O grau de interferência entre uma comunidade de plantas daninhas e a cultura principal é determinado por diversos fatores. Esses incluem características próprias da cultura, como a variedade cultivada e o espaçamento entre as plantas; características da comunidade de plantas daninhas, como sua composição específica, densidade e distribuição no campo; fatores ambientais; e o momento e a duração da convivência entre as duas comunidades (Pitelli, 1983). Compreender os efeitos de cada um desses fatores e sua interação é crucial para determinar o melhor método de manejo das plantas daninhas (Bozsa; Oliver, 1993).

As plantas daninhas de ocorrência mais frequente na cultura do amendoim são geralmente as “herdadas” da cultura da cana-de-açúcar. Dentre estas, pode-se destacar do grupo das anuais: *Digitaria* spp., *Brachiaria* spp., *Panicum maximum*, *Portulaca oleraceae*, *Amaranthus* spp., *Eleusine indica* e *Sida* spp. Do grupo das perenes, tem-se: *Cynodon dactylon* e *Cyperus rotundus*. Há outras espécies de ocorrência mais recente e que têm se tornado motivo de preocupação, como: *Bidens pilosa*, *Chloris* spp., *Tridax procumbens*, *Eragrotis pilosa*, *Ipomoea* spp., *Merremia* spp., *Mormodica charantia*, *Ricinus communis*, *Rottboellia cochichinensis*, *Senna obtusifolia* e *Commelina*

benghalensis (Carrega *et al.*, 2022). A competição das plantas daninhas com a cultura do amendoim pode causar danos econômicos que variam entre 20% (Hauser; Parham, 1975; Gaviolli, 1985) e 92% (Dias *et al.*, 2005; Nepomuceno *et al.*, 2007).

Para um cultivo tecnificado e em maior escala, o manejo mais eficiente, rápido e econômico é por meio do controle químico das plantas daninhas (Alvino *et al.*, 2011). Nesse contexto, é importante mensurar o impacto das plantas daninhas, nível de infestação e agressividade das espécies. O nível de infestação depende da espécie, solo, banco de sementes presentes na área, clima etc. O potencial competitivo varia de espécie para espécie, por isso, manter a área de produção limpa no início do desenvolvimento das plantas de amendoim, proporciona maior sobrevivência da cultura. Diante disso, o uso de herbicidas pré-emergentes pode promover menor competição da cultura com as plantas daninhas.

2.3 Uso de herbicidas na cultura do amendoim

No Brasil, para a cultura do amendoim existem poucos herbicidas registrados junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), apenas 8 ingredientes ativos (Agrofit, 2026). Sendo eles: Alacloro, Bentazona, Cletodim, Imazamox, Imazapique, Pendimetalina, Quizalofop-P-etílico e Trifluralina. Desses, os principais utilizados em pós-emergência são Bentazona, Cletodim, Imazamox, Imazapique e Quizalofop-P-etílico. O Imazapique (o mais utilizado) e os demais herbicidas, por mais que estejam registrados para cultura, ainda possuem efeitos tóxicos e afetam seu desenvolvimento e produtividade (Zanardo *et al.*, 2018; Price *et al.*, 2021; Simarmata *et al.*, 2023; Daramola *et al.*, 2024). Assim como os outros membros do grupo das imidazolinonas, a recomendação de aplicação é dose baixa, o que dificulta a identificação do residual desses compostos no solo (Ramezani *et al.*, 2009). Plateau® é um dos herbicidas à base do ingrediente ativo Imazapique recomendado para o controle de plantas daninhas na cultura do amendoim e da cana-de-açúcar, sendo o mais utilizado nas áreas de cultivo.

A ação do Plateau® está ligada a redução dos níveis de três aminoácidos alifáticos de cadeia ramificada, a valina, leucina e isoleucina, por meio da inibição da ácido hidroxiacético sintetase (AHAS), uma enzima comum na via biossintética desses aminoácidos. Essa inibição interrompe a síntese proteica, que consequentemente interfere na síntese de DNA e no crescimento celular. A biossíntese desses três aminoácidos e a enzima AHAS não ocorrem em animais, o que explica sua baixa toxicidade aguda oral e

dérmica (Agrolink, 2024). A utilização de herbicidas, mesmo em cultivares tolerantes, pode criar condições de estresse que se manifestam através de intoxicação, impactando o crescimento, desenvolvimento e rendimento das culturas. Esse estresse é desencadeado pelo dano oxidativo causado pelas espécies reativas de oxigênio (EROs), as quais reagem com lipídios, proteínas, pigmentos e ácidos nucleicos, levando à peroxidação lipídica, danos às membranas e inativação de enzimas, comprometendo assim a viabilidade celular (Mittler, 2002, Daramola *et al.*, 2024).

2.4 Utilização de bioinsumos no amendoim

Devido aos poucos herbicidas registrados para a cultura do amendoim e o estresse metabólico causado pela utilização de pós-emergentes, a demanda por bioinsumos para a cultura se faz necessária. O amendoim é uma leguminosa que tem a capacidade de associar-se com microrganismos, como o grupo de *Rhizobium* spp. e *Bradyrhizobium* spp., especialmente com a função de Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) e *Pseudomonas* spp., *Bacillus* spp., *Azospirillum* spp. e *Enterobacter* spp., como bactérias promotoras de crescimento vegetal (BPCV). Do ponto de vista agrônomo, essas associações têm a função de reduzir a dependência de fertilizantes ou permitir a tolerância a estresse, como de temperatura e salinidade. Estirpes com eficiência agrônoma podem ser candidatas a bioinsumos como inoculantes, assim como práticas de co-inoculação podem potencializar essas respostas.

2.5 Estirpes bacterianas

Burkholderia é um gênero de bactérias Gram-negativas diverso e versátil, com mais de 80 espécies formalmente nomeadas e múltiplos outros grupos genotípicos que provavelmente representam novas espécies. Diversas estirpes são reconhecidas por elevar a resistência das plantas a patógenos, auxiliar no uso mais eficiente da água e potencializar a fixação de nitrogênio, além de favorecer a adaptação do hospedeiro a condições de estresse ambiental.

Nas últimas duas décadas, a pesquisa sobre espécies de *Burkholderia* tem se expandido constantemente. Os membros do gênero *Burkholderia* são muito abundantes, ocupando diversos nichos ecológicos (Estrada-de los Santos, 2001; Coenye; Vandamme, 2003), incluindo o solo. Apesar de alguns representantes do gênero *Burkholderia* serem patogênicos ou estarem relacionados a doenças em seus hospedeiros, a maioria das

espécies associadas às plantas não apresenta patogenicidade, podendo ser neutras ou até benéficas para o hospedeiro (De Costa; Erabadupitva, 2005).

O gênero *Bacillus* foi descrito inicialmente por Cohn (1872), que o caracterizou como bactérias formadoras de endósporos termorresistentes. As espécies desse gênero pertencem ao Reino *Bacteria*, Filo *Firmicutes*, Classe *Bacilli*, Ordem *Bacillales* e Família *Bacillaceae* (Maughan e van der Auwera, 2011). Atualmente, o gênero compreende mais de 336 espécies descritas. As espécies de *Bacillus* são bactérias aeróbicas, esporulantes e em forma de bastonete, ubíquas na natureza. As espécies do gênero *Bacillus* apresentam ampla distribuição global, principalmente devido à capacidade de formar endósporos, o que lhes confere elevada resistência e facilita sua sobrevivência e isolamento em diferentes ambientes, incluindo ecossistemas aquáticos e terrestres, bem como em condições ambientais extremas (Tejera-Hernández *et al.*, 2011). Contudo, o solo é considerado o principal reservatório dessas bactérias, uma vez que a maioria das espécies é saprófita e capaz de utilizar uma ampla variedade de substratos orgânicos presentes nesse ambiente, que constitui uma matriz favorável para o desenvolvimento de elevada diversidade genética e funcional de microrganismos (McSpadden, 2004).

3 HIPÓTESES

H1 – O uso das bactérias proporcionará melhor desenvolvimento de plantas de amendoim;

H2 – As bactérias atenuarão os efeitos do herbicida nas respostas bioquímicas das plantas de amendoim;

H3 – As duas espécies bacterianas apresentarão desempenho diferenciado como atenuantes do estresse herbicida, com respostas distintas entre os tipos de solo avaliados.

4 OBJETIVOS

Verificar se o uso de *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata* auxilia na redução do estresse causado por Imazapique em plantas de amendoim em diferentes tipos de solo.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

Foram realizados dois experimentos, instalados na área experimental do Laboratório de Plantas Daninhas da UNESP, Câmpus Jaboticabal. A área está localizada

na latitude 21°14'39.83" S e longitude 48°17'56.84" O, em uma altitude de 606 m, na cidade de Jaboticabal, região norte do estado de São Paulo, Brasil. Foram desenvolvidos dois experimentos com diferentes tipos de solo. Para o experimento 1 (solo argiloso), foi utilizado uma mistura de solo coletado na camada arável de um Latossolo Vermelho-Escuro com areia de rio (2:1 v/v). Já para o experimento 2 (solo arenoso), utilizou-se uma mistura de areia de rio com solo coletado na camada arável de um Latossolo Vermelho-Escuro (2:1 v/v). Com base na análise química prévia destes substratos (Tabela 1), foi realizada a correção de fertilidade e de pH, seguindo a recomendação para a cultura do amendoim. Ambos os solos receberam adubação de semeadura e de cobertura, sendo utilizado formulado N-P-K, 4:14:8 na quantidade equivalente a 300 kg ha⁻¹.

Tabela 1. Características físicas e químicas de uma amostra composta do solo extraída do monte de solo da área experimental.

pH	MO	P resina	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	SB	CTC	V	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----							%	-----g.kg ⁻¹ -----		
4,6	3	4	0,5	8	2	21	0	10,4	31,0	33	75	2	22

Para ambos os experimentos, foram utilizadas duas estirpes de bactérias isoladas de amendoim, sendo elas *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata*. Foram utilizados vasos com capacidade de 20 L, onde as sementes foram inoculadas com as respectivas bactérias, sendo semeadas três sementes por vaso, com adicional de 1 mL do inóculo no sulco. A cultivar de amendoim utilizada foi a IAC 503.

O delineamento experimental foi blocos casualizados em esquema fatorial 3x2, no qual constituíram os fatores: com inoculação de *Burkholderia lata*; *Bacillus inaquosorum* e o controle sem inoculação bacteriana, em duas situações: com e sem aplicação de herbicida imazapique, em dose única de 140 g p.c. ha⁻¹ seguindo a recomendação do fabricante.

5.2 Curva de crescimento e unidades formadoras de colônias

A curva de crescimento foi realizada em triplicata, a partir do preparo de um pré-inóculo inicial de cada uma das bactérias. Para a redução dos efeitos de possíveis células mortas presentes na cultura, as bactérias cultivadas em 250 mL de YMA (Yeast Mannitol Agar) foram recuperadas durante a fase exponencial de crescimento, cinco dias após cultivo em placas de petri contendo meio YMA, através da transferência de uma massa bacteriana com auxílio da alça de Drigalsky.

Uma massa bacteriana de três placas de cultivo foi diluída em cinco mL de água milli-Ro estéril. Registrou-se a turbidez do “pré-inóculo” através da leitura da densidade óptica em 600 nm (DO_{600}) em espectrofotômetro Eppendorf. O pré-inóculo com um volume de 10 mL contendo uma DO_{600} nm de 0,6 foi adicionado em um erlenmeyer contendo 100 mL de meio de cultura YML (Yeast Mannitol Liquid) de concentração inicial. Após o preparo das culturas bacterianas, os frascos foram mantidos sob agitação constante, em um agitador orbital a 150 rpm a 30°C. A densidade celular foi avaliada por meio da leitura de absorbância do meio de cultura a 600 nm (DO_{600}), sendo retiradas alíquotas de 100 µL a cada hora de cultivo. A contagem de unidades formadoras de colônias (UFC) foi realizada a cada 12 horas, mediante inoculação de alíquotas em placas contendo meio YMA, previamente submetidas a diluições seriadas de 10^{-4} a 10^{-7} . As placas foram incubadas a 25 °C por 48 horas para posterior contagem de células viáveis.

A escolha do momento de inoculação bacteriana é um fator determinante para o sucesso da colonização e para a eficiência fisiológica dos microrganismos utilizados como inoculantes. Segundo Jakobsen *et al.* (2004), a qualidade do inóculo está diretamente relacionada à fase da curva de crescimento bacteriano em que as células se encontram no momento da aplicação.

A curva de crescimento bacteriano é dividida em quatro fases principais: fase lag, fase logarítmica (ou exponencial), fase estacionária e fase de declínio/morte celular. Na fase lag ocorre adaptação fisiológica das bactérias ao meio, com baixa divisão celular. Na fase logarítmica há intensa atividade metabólica e elevada taxa de multiplicação celular, sendo esta a fase em que as células apresentam maior vigor fisiológico. Já na fase estacionária ocorre estabilização do crescimento devido à limitação de nutrientes e acúmulo de metabólitos, enquanto na fase de declínio há redução da viabilidade celular e aumento da mortalidade bacteriana.

De acordo com Jakobsen *et al.* (2004), inóculos produzidos no final da fase logarítmica e início da fase estacionária apresentaram maior viabilidade, menor período de adaptação após inoculação e maior uniformidade de crescimento quando comparados a células oriundas de fases mais tardias da curva. Isso ocorre porque, nesse momento, as bactérias ainda mantêm elevada atividade metabólica e integridade fisiológica, mas já atingiram alta densidade celular, favorecendo a sobrevivência e colonização após aplicação.

Por outro lado, culturas obtidas em fase estacionária tardia ou em declínio apresentaram menor atividade fisiológica, maior indução de mecanismos de

sobrevivência, como esporulação, e menor capacidade de retomada do crescimento após inoculação. Dessa forma, a utilização de células bacterianas em fase logarítmica média/final ou início da fase estacionária é considerada a condição mais adequada para inoculação, principalmente em estudos envolvendo bactérias promotoras de crescimento vegetal e atenuadoras de estresse.

Para *Burkholderia lata*, embora a fase logarítmica se estenda além de 40 horas de cultivo, o ponto de 12 horas foi selecionado para a inoculação por representar densidade celular compatível com as concentrações recomendadas para inoculantes bacterianos (aproximadamente 10^8 a 10^9 UFC mL⁻¹), conforme preconizado para bactérias promotoras de crescimento vegetal. Para *Bacillus inaquosorum*, o momento ideal para inoculação foi em torno de 4 horas após o início do crescimento, também com base na densidade celular obtida. (Figura 1).

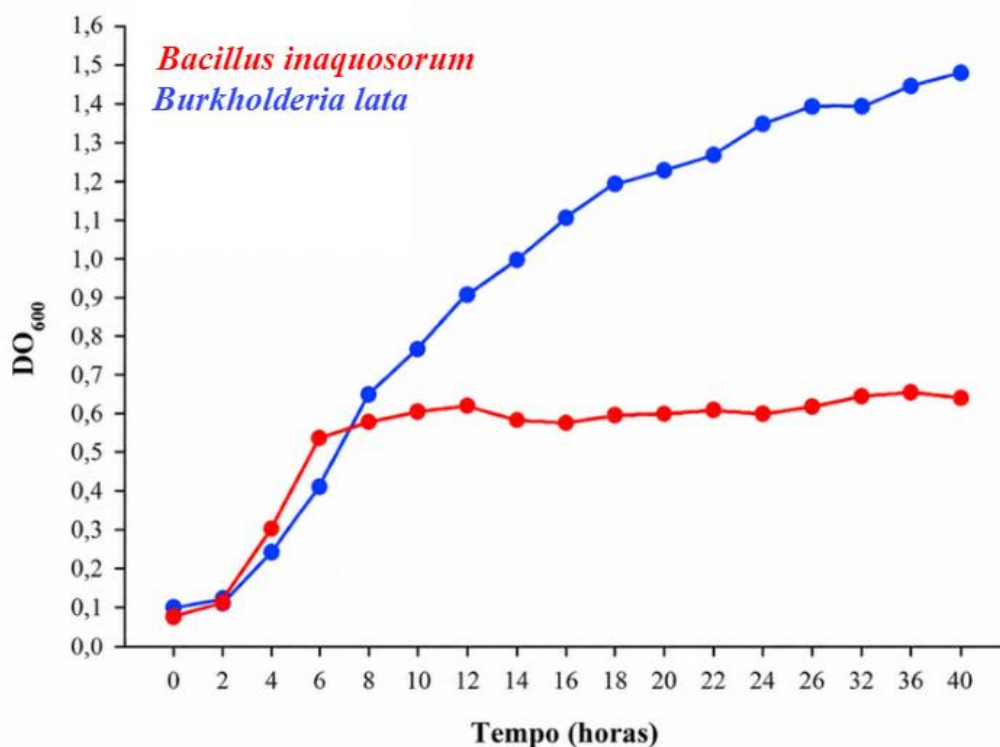


Figura 1. Curva de crescimento bacteriano

5.3 Inoculação das sementes

Na inoculação foram utilizadas células e os metabólitos extracelulares liberados para o meio de cultivo. As bactérias selecionadas foram crescidas em frascos Erlenmeyer contendo 250 mL de meio YML cada, por 24 horas, sob agitação de 150 rpm, à temperatura 30°C. Posteriormente, a densidade óptica (DO) dos cultivos foi determinada em espectrofotômetro a 600 nm, sendo, a seguir, realizada a diluição de todos os inóculos

para a $DO_{600nm} = 1.0$ ou 108 UFC mL^{-1} utilizando meio YML. Para os tratamentos com as estirpes bacterianas foi realizada a inoculação em sulco com a aplicação de 1ml por sulco de plantio, juntamente com a semente.

O tratamento das sementes foi realizado em béqueres para cada tratamento mergulhando a sementes no meio por cinco minutos, sendo que o grupo controle não recebeu o meio YMA, enquanto as sementes dos demais tratamentos foram tratadas com as células e os metabólitos extracelulares.

5.4 Aplicação do imazapique

Para a aplicação dos tratamentos foi utilizado um pulverizador costal com pressurização por CO_2 , munido de uma barra de pulverização contendo quatro bicos espaçados em 0,5 m entre si, com pontas de pulverização Teejet modelo TTI 11002 na pressão de aproximadamente 2 bar, tendo uma gota ultragrossa, ideal para herbicidas sistêmicos. A barra de pulverização foi mantida a 0,5 m de altura em relação ao alvo, com velocidade de aplicação de $3,6 \text{ km h}^{-1}$, com vazão de 200 L ha^{-1} .

5.5 Avaliações biométricas do amendoim

Aos 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA) do imazapique foi avaliada a fitotoxicidade visual, seguindo escala proposta pela EWRC (1964), na qual, nota 1 representa 0 de intoxicação e nota 9 a morte das plantas (Tabela 2). A altura (cm) foi mensurada aos 45 dias após emergência (DAE), medindo da base da planta até o seu ápice utilizando régua graduada.

Tabela 2. Escala de notas da EWRC (1964) adotada para as avaliações de fitointoxicação do produto.

Nota	Fitointoxicação
1	Nula
2	muito leve
3	Leve
4	Regular
5	Média
6	quase forte
7	Forte
8	muito forte
9	destruição total

Com os dados das avaliações biométricas medidas ao fim do estágio vegetativo (45 DAE) foram determinadas as seguintes características: área foliar, determinada por meio do aplicativo Canopeo; massa seca de folhas, de caule e massa seca da parte aérea, mensuradas em balança analítica com precisão de 0,001 g. Nas raízes das plantas de cada um dos tratamentos foram quantificadas a massa seca, que foram obtidas a partir da secagem em estufas de circulação forçada à 60°C por 72 horas, e o comprimento, por meio de régua.

5.6 Avaliações bioquímicas na planta

As amostras de material vegetal (raízes e folhas) coletadas durante as avaliações biométricas aos 45 DAE e estocadas em freezer - 80°C foram maceradas em N₂ líquido e homogeneizadas em tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) contendo 1 mM de ácido etileno diamino tetracético (EDTA), 3 mM de ditioneína (DTT) e 4% de polivinil polipirrolidona (PVPP). A mistura foi centrifugada a 10.000 rpm por 30 min a 4°C. O sobrenadante foi dividido em alíquotas, mantidas a -80°C e utilizadas nos ensaios enzimáticos (Azevedo *et al.*, 1998).

Peroxidação lipídica

A caracterização do estresse oxidativo foi realizada por meio da quantificação do teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), utilizadas como indicador da concentração de malondialdeído (MDA), produto do processo de peroxidação lipídica e marcador da intensidade do estresse oxidativo. As amostras (0,2 g) foram maceradas com 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% contendo aproximadamente 20% de polivinilpolipirrolidona (PVPP). Após completa homogeneização, 1,4 mL foi transferido para tubo eppendorf e centrifugado a 10.000 rpm por 5 minutos.

Do sobrenadante foram retirados 250 µL, aos quais foram adicionados 1 mL de TCA 20% contendo 0,5% de ácido tiobarbitúrico (TBA). A mistura foi incubada em banho seco a 95 °C por 30 minutos e resfriada em gelo por 10 minutos. Em seguida, as amostras foram centrifugadas a 10.000 rpm por 10 minutos para separação dos resíduos formados durante o aquecimento e remoção de partículas em suspensão que poderiam interferir nas análises subsequentes. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 535 e 600 nm. A concentração de MDA foi calculada conforme equação específica para a reação e os resultados foram expressos em µmol L⁻¹ de extrato (Shimizu *et al.*, 2006).

5.7 Análise dos dados

Os dados de cada tipo de solo foram submetidos à análise de variância em esquema fatorial 3×2 , considerando os efeitos dos fatores inoculação bacteriana (controle sem inoculação, *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata*) e aplicação de herbicida (presença e ausência de imazapique), bem como a interação entre esses fatores, em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa Sisvar 5.3 (Ferreira, 2011).

Adicionalmente, as variáveis biométricas avaliadas no estágio vegetativo foram submetidas à Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis* – PCA), utilizando dados padronizados (média igual a zero e desvio-padrão igual a um), conforme recomendado por Jolliffe (2002). Essa análise teve como objetivo reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de associação entre os tratamentos e as variáveis avaliadas, permitindo a visualização da estrutura multivariada dos dados por meio dos componentes principais.

Também foi realizada análise de agrupamento hierárquico (*Hierarchical Cluster Analysis* – HCA), utilizando a distância Euclidiana como medida de dissimilaridade e o método de agrupamento de Ward (Ward, 1963), visando identificar grupos de tratamentos com comportamento semelhante em função das variáveis biométricas avaliadas. Segundo Legendre e Legendre (2012), esse método minimiza a variância intragrupo durante o processo de formação dos agrupamentos, proporcionando elevada eficiência na identificação de padrões biológicos.

As análises multivariadas foram conduzidas no ambiente estatístico R (R Core Team, 2025), sendo empregadas funções dos pacotes stats, FactoMineR, factoextra e ggplot2 para processamento e representação gráfica dos resultados.

6 RESULTADOS

6.1 Solo arenoso

6.1.1 Estádio vegetativo

Avaliando o comprimento da parte aérea (CPA) das plantas de amendoim durante o estágio vegetativo, quando observado o comportamento das bactérias na presença do fator herbicida, *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata* não apresentam diferença

significativa, porém ambas diferiram significativamente do controle, que proporcionou menor comprimento de parte aérea, com redução aproximada de 38% em relação a *B. lata* e 35% em relação a *B. inaquosorum* (Figura 2). Quando avaliada na ausência do herbicida no sistema, notou-se que não há diferença significativa entre os efeitos das bactérias e o controle.

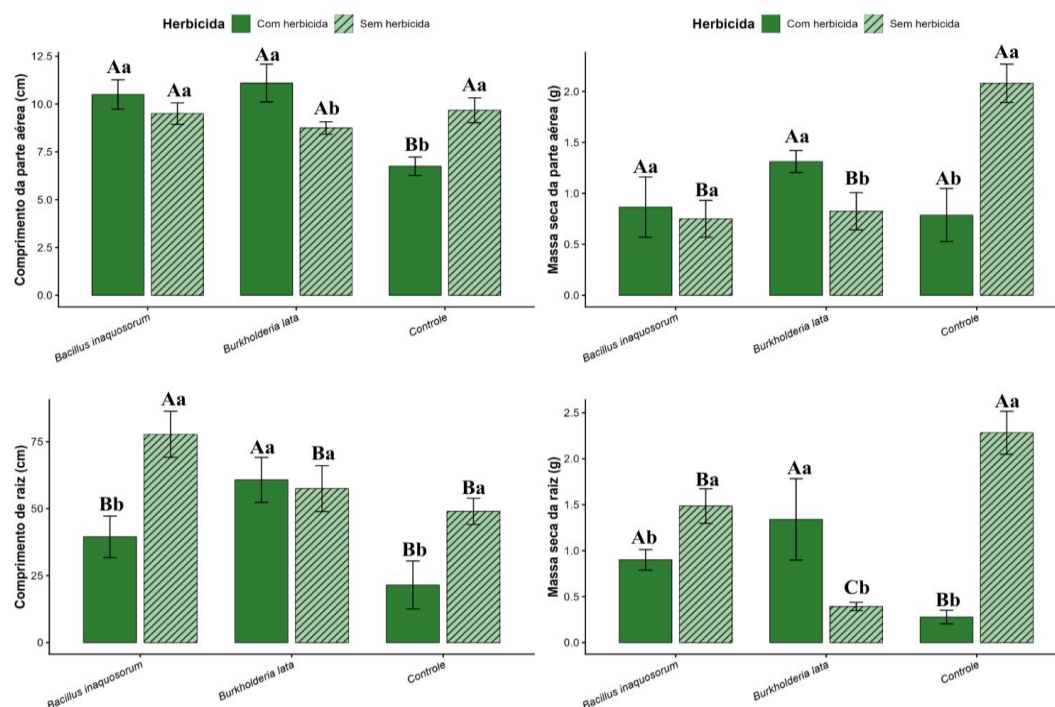


Figura 2. Gráficos das variáveis biométricas de plantas de amendoim no estágio vegetativo em solo arenoso

Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento de inoculação, observa-se que para *B. inaquosorum* não houve diferença significativa entre a presença e a ausência de herbicida. Para *B. lata*, a ausência do herbicida resultou em menor comprimento da parte aérea em comparação à condição com herbicida, o que indica que a inoculação com essa estirpe atenuou o efeito inibitório do imazapique, mantendo o crescimento em níveis superiores aos esperados sob condição de estresse. Na ausência do herbicida, *B. lata* apresentou comprimento da parte aérea equivalente ao controle sem inoculação, não havendo, portanto, evidências de efeito negativo da bactéria sobre o crescimento vegetal nessa condição. No tratamento controle, a ausência de herbicida promoveu incremento aproximado de 30% no comprimento da parte aérea, passando de cerca de 7 cm com aplicação para aproximadamente 10 cm sem aplicação (Figura 2). Letras maiúsculas indicam comparação entre os tratamentos de inoculação dentro de cada

condição de herbicida, e letras minúsculas indicam comparação entre as condições de herbicida dentro de cada tratamento de inoculação (Tukey, $p \leq 0,05$).

Para a massa seca da parte aérea, na presença de herbicida, não houve diferenças significativas entre os tratamentos. Na ausência de herbicida, o controle proporcionou massa seca da parte aérea aproximadamente 2,5 vezes superior à dos tratamentos inoculados (Figura 2). Para *B. inaquosorum*, não houve diferença significativa entre as condições de presença e ausência de herbicida. Para *B. lata* e o controle, foram observadas diferenças significativas entre as condições de herbicida para essa variável

Para o comprimento de raiz, plantas com *B. lata* com herbicida registraram média de aproximadamente 62 cm, diferenciando-se significativamente dos demais tratamentos. Na ausência de herbicida, *B. inaquosorum* proporcionou o maior comprimento radicular, com aproximadamente 77 cm, sendo significativamente superior a dos demais tratamentos. Na comparação do fator herbicida dentro de cada tratamento, observou-se que, para *B. inaquosorum*, a aplicação do herbicida reduziu o comprimento de raiz de aproximadamente 77 cm para 38 cm (49%). Resultado semelhante foi observado no tratamento controle, no qual ocorreu redução aproximada de 56% no comprimento radicular. Por outro lado, *B. lata* não proporcionou diferença significativa entre presença e ausência do herbicida (Figura 2).

Para a massa seca de raiz, *B. lata* e *B. inaquosorum* na presença do herbicida proporcionaram as maiores médias entre os tratamentos, com aproximadamente 1,35 g e 0,9 g, respectivamente. Na comparação do fator herbicida dentro de cada tratamento, foram observadas diferenças significativas para todos os tratamentos avaliados (Figura 2). Para *B. inaquosorum* e o controle, a aplicação do herbicida resultou em menor massa seca de raiz em comparação à ausência de aplicação. Em contraste, para *B. lata* ocorreu o efeito inverso, em que a presença do herbicida promoveu maior massa seca radicular quando comparada à ausência de imazapique.

A Análise de Componentes Principais (PCA) demonstrou diferenças importantes na resposta dos tratamentos em função da presença do herbicida e do tipo de solo, permitindo identificar padrões multivariados de associação entre os tratamentos e as variáveis biométricas avaliadas no estágio vegetativo. No solo arenoso (Figura 3), os componentes principais PC1 e PC2 explicaram conjuntamente 76,0% da variabilidade total dos dados, sendo 44,8% atribuídos ao PC1 e 31,2% ao PC2. Essa elevada porcentagem indica boa representatividade do modelo multivariado. Observa-se

tendência de separação parcial entre os tratamentos com e sem herbicida ao longo do PC1, indicando influência da aplicação do herbicida sobre a estrutura multivariada dos dados.

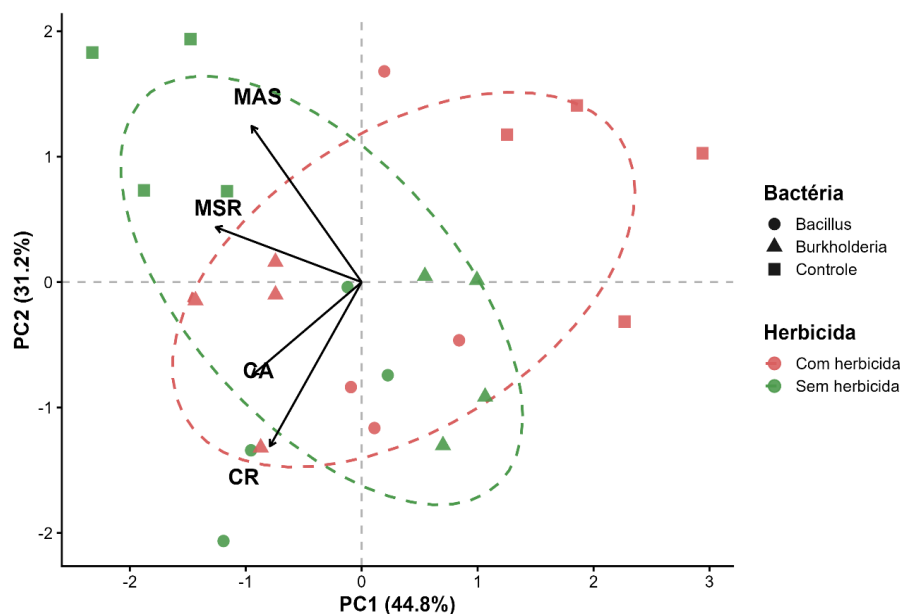


Figura 3. PCA das variáveis biométricas no estágio vegetativo em solo arenoso.

A análise de componentes principais (PCA) explicou 76,0% da variância total dos dados, sendo 44,8% atribuídos ao PC1 e 31,2% ao PC2. No PC1, os vetores de massa seca radicular (MSR) e comprimento da parte aérea (CA) apresentaram orientação para o lado negativo, indicando que escores mais negativos nesse componente estão associados a maior acúmulo de biomassa radicular e maior comprimento aéreo. No PC2, o vetor de massa aérea seca (MAS) associou-se ao lado positivo, enquanto o comprimento radicular (CR) apresentou orientação para o lado negativo, refletindo uma separação entre essas variáveis de biomassa e crescimento radicular no segundo componente.

Em relação ao posicionamento dos tratamentos, o controle sem herbicida concentrou-se predominantemente no lado negativo do PC1, associando-se a maiores valores de MSR e CA. Em contraste, o controle com herbicida deslocou-se para o lado positivo do PC1, indicando redução dessas variáveis sob condição de estresse na ausência de inoculação. Os tratamentos com *Burkholderia lata* com herbicida agruparam-se majoritariamente no lado negativo do PC1, com perfil fisiológico semelhante ao controle sem herbicida, sugerindo que a inoculação com essa estirpe foi capaz de preservar o desenvolvimento radicular e o crescimento aéreo mesmo sob aplicação do imazapique. Os tratamentos com *Burkholderia lata* sem herbicida e com *Bacillus inaquosorum* distribuíram-se de forma mais dispersa, com maior sobreposição entre as elipses dos

grupos com e sem herbicida, indicando menor contraste fisiológico entre essas condições (Figura 3).

Os vetores CA e CR apresentaram orientação semelhante entre si, ambos direcionados para o quadrante inferior esquerdo da PCA, distinta da orientação dos vetores MAS e MSR, que se projetaram para o quadrante superior esquerdo. Essa separação angular entre os vetores de crescimento longitudinal (CA e CR) e os de acúmulo de biomassa (MAS e MSR) sugere dissociação entre essas duas dimensões do desenvolvimento vegetal, indicando que, sob condição de estresse herbicida, as plantas podem manter o crescimento estrutural sem incremento proporcional na produção de matéria seca. Esse comportamento é compatível com respostas adaptativas descritas para condições de estresse moderado (Mittler, 2002). A maior dispersão dos pontos ao longo do gráfico nos tratamentos com herbicida reforça a heterogeneidade das respostas fisiológicas sob condição de estresse, enquanto a distribuição intermediária dos tratamentos inoculados com *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata* sugere potencial efeito mitigador sobre os danos causados pelo imazapique (Figura 3).

A análise de agrupamento hierárquico para o solo arenoso no estágio vegetativo (Figura 4), conduzida pelos critérios de distância euclidiana e método Ward.D2, resultou na formação de dois grupos distintos. O primeiro grupo, representado pelo fundo azul, é composto exclusivamente pelo tratamento controle com herbicida (Sb_CH), que se isolou dos demais com distância de fusão de aproximadamente 4,0 em relação ao segundo grupo, configurando o tratamento de maior dissimilaridade multivariada no solo arenoso.

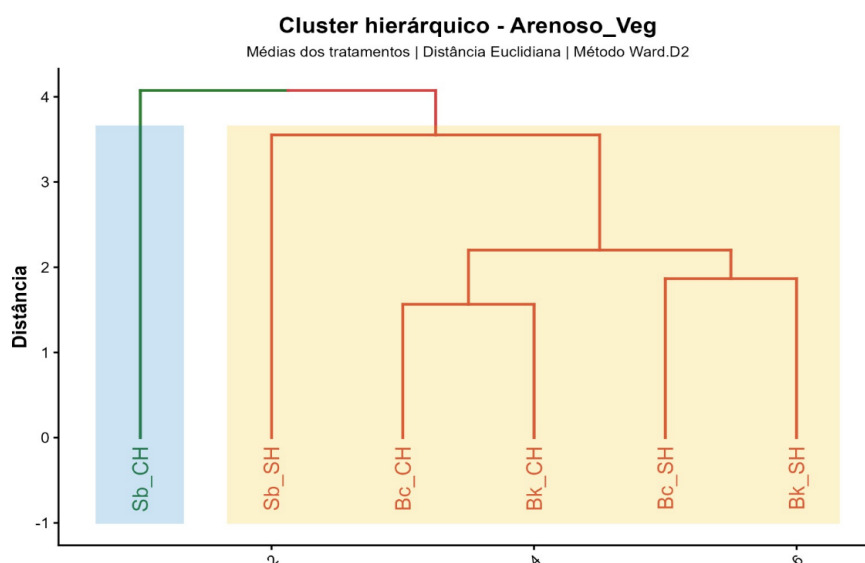


Figura 4. Análise de agrupamento hierárquico (Cluster) no estágio vegetativo em solo arenoso.

O segundo grupo, representado pelo fundo amarelo, reuniu os cinco tratamentos restantes: controle sem herbicida (Sb_SH), *Bacillus inaquosorum* com herbicida (Bc_CH), *Burkholderia lata* com herbicida (Bk_CH), *Bacillus inaquosorum* sem herbicida (Bc_SH) e *Burkholderia lata* sem herbicida (Bk_SH). Dentro desse grupo, a estrutura interna revelou um padrão de agrupamento determinado pelo fator herbicida, e não pela espécie bacteriana. Os tratamentos Bc_CH e Bk_CH formaram o primeiro par, com fusão interna a distância de aproximadamente 1,6, agrupando as duas estirpes bacterianas sob condição de aplicação de herbicida. De forma análoga, Bc_SH e Bk_SH constituíram o segundo par, com fusão interna a distância de aproximadamente 1,9, reunindo as mesmas estirpes na ausência do herbicida. Esses dois pares se uniram entre si a distância de aproximadamente 2,2, formando um subgrupo composto pelos quatro tratamentos bacterianos. O controle sem herbicida (Sb_SH) foi o último a se associar a esse subconjunto, a distância de aproximadamente 3,5, caracterizando-o como o tratamento de maior dissimilaridade dentro do segundo grupo. Esse padrão indica que, no solo arenoso durante o estágio vegetativo, a aplicação do imazapique exerceu maior influência sobre a estrutura multivariada dos dados do que a espécie bacteriana utilizada na inoculação, sugerindo que o herbicida foi o principal fator modulador do perfil fisiológico das plantas nesse ambiente (Figura 4).

6.1.2 Estádio reprodutivo

As variáveis massa seca de folha, massa seca de caule e massa seca de vagem não apresentaram diferenças significativas em nenhuma das comparações realizadas, nem entre os tratamentos bacterianos dentro de cada condição de herbicida, nem entre as condições de herbicida dentro de cada tratamento (Figura 5).

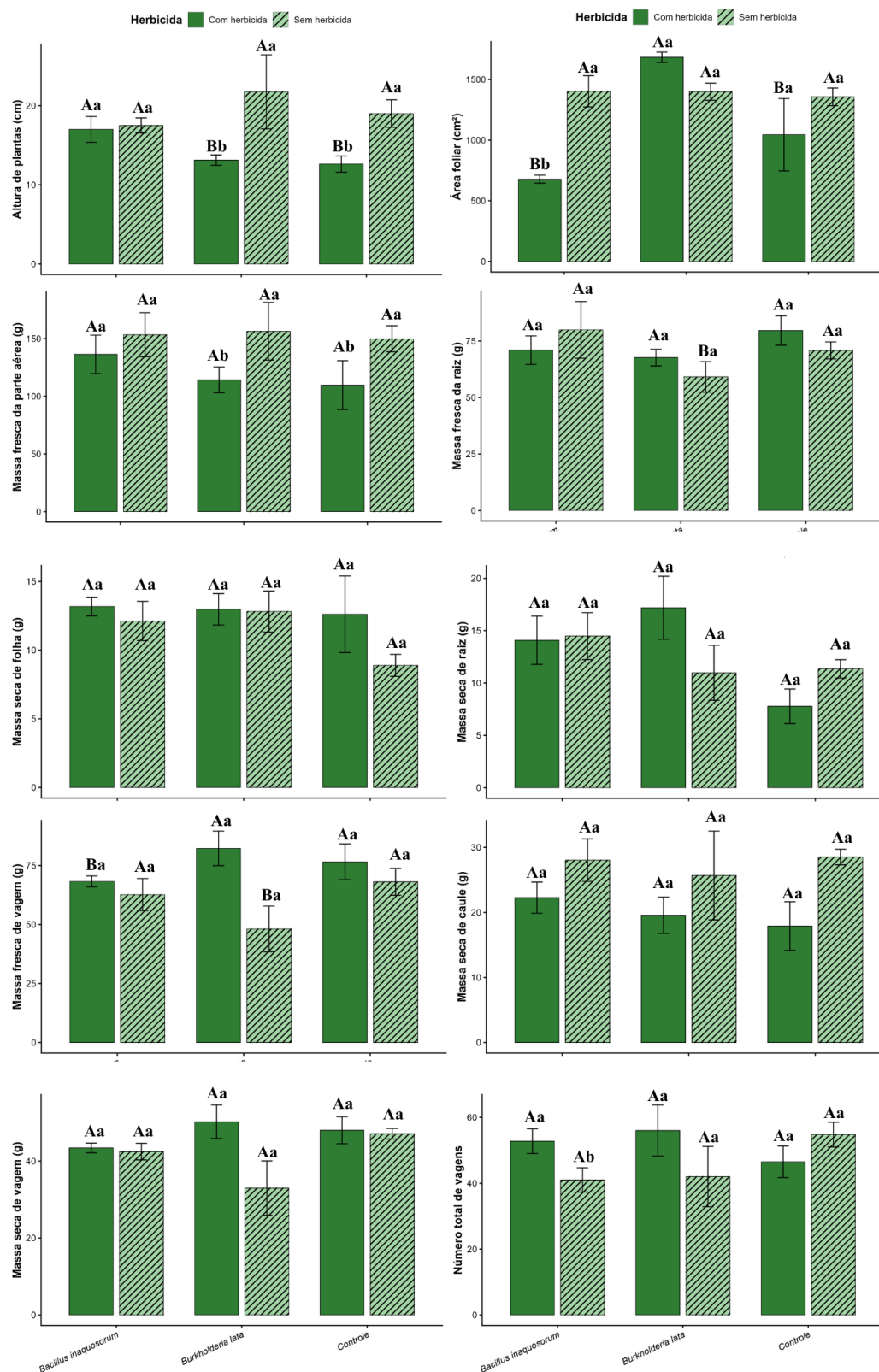


Figura 5. Gráficos das variáveis biométricas do amendoim no estágio reprodutivo em solo arenoso

No estágio reprodutivo em solo arenoso, os resultados de maior destaque foram observados para altura de plantas e área foliar, variáveis nas quais a inoculação bacteriana

promoveu respostas mais expressivas na presença do herbicida. Para a altura de plantas, *B. inaquosorum* proporcionou o maior valor na presença do herbicida (15 cm), diferindo significativamente de *B. lata* e do controle, que não diferiram entre si. Na ausência do herbicida, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* não apresentou diferença entre as condições, enquanto *B. lata* e o controle apresentaram maior altura na ausência do herbicida.

Para a área foliar, *B. lata* se destacou na presença do herbicida, atingindo o maior valor (1.650 cm²) e diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (700 cm²) e do controle (1.050 cm²), que não diferiram entre si. Esse resultado é particularmente relevante pois indica que, mesmo sob aplicação de imazapique, *B. lata* foi capaz de manter área foliar superior aos demais tratamentos, o que pode estar associado à manutenção da capacidade fotossintética da planta sob condição de estresse. Na ausência do herbicida, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* apresentou área foliar aproximadamente 100% superior na ausência do herbicida em relação à condição com aplicação, enquanto *B. lata* e o controle não diferiram entre as condições.

Para a massa fresca da parte aérea, não houve diferença significativa entre os tratamentos em nenhuma das condições de herbicida. Para *B. lata* e o controle, a ausência do herbicida resultou em maiores valores, configurando diferença significativa dentro de cada um desses tratamentos, enquanto *B. inaquosorum* não promoveu diferença entre as condições (Figura 5).

Para a massa seca da raiz, na presença do herbicida, *B. inaquosorum* (15 g) e *B. lata* (17,5 g) não diferiram entre si e foram superiores ao controle em aproximadamente 150% e 192%, respectivamente. Na ausência do herbicida e na comparação do fator herbicida dentro de cada tratamento, não houve diferenças significativas (Figura 5).

Para a massa fresca de vagem, na presença do herbicida, *B. lata* (80 g), que também apresentou maior área foliar nessa condição, não diferiu do controle (75 g), sendo ambos superiores a *B. inaquosorum* (67 g). Na ausência do herbicida, *B. lata* (49 g) proporcionou o menor valor, diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (63 g) e do controle (70 g), que não diferiram entre si. Nenhum dos tratamentos apresentou diferença significativa entre as condições de herbicida para esta variável (Figura 5).

Para o número total de vagens, não houve diferença significativa entre os tratamentos em nenhuma das condições de herbicida. *B. inaquosorum* foi o único

tratamento a apresentar diferença significativa entre as condições, com maior número de vagens na presença do herbicida (54) em relação à ausência (41). *Burkholderia lata* e o controle não diferiram entre as condições para esta variável (Figura 5).

6.1.3 Análises MDA estágio vegetativo

Os teores de MDA não apresentaram diferenças significativas entre as condições de herbicida nos tratamentos inoculados com *B. inaquosorum* (2,2 $\mu\text{mol L}^{-1}$ com herbicida e 2,6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ sem herbicida) e *B. lata* (2,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ com herbicida e 2,6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ sem herbicida), indicando que a presença do imazapique não alterou o nível de peroxidação lipídica nas plantas inoculadas (Figura 6).

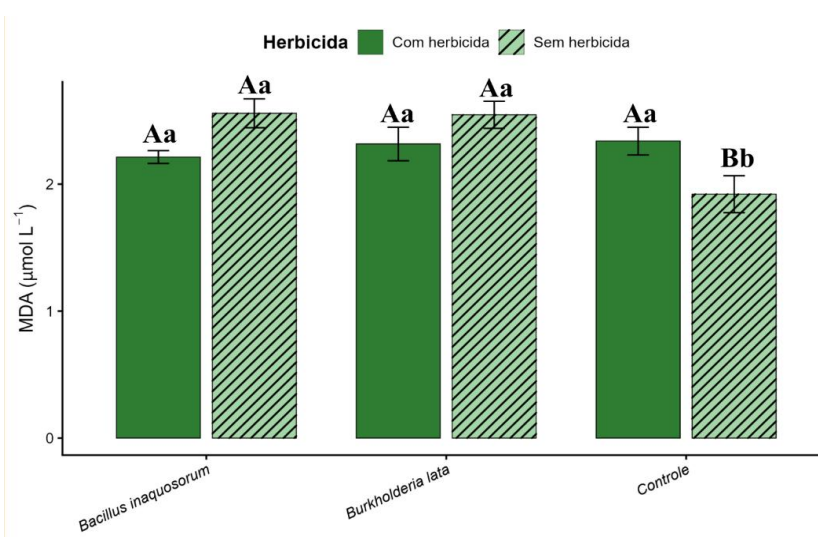


Figura 6. Teores de malondialdeído (MDA) em plantas de amendoim cultivadas em solo arenoso.

No tratamento controle, observou-se diferença significativa entre as condições de herbicida, com maior teor de MDA na presença do herbicida (2,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$) em relação à ausência (1,9 $\mu\text{mol L}^{-1}$). Adicionalmente, na ausência de herbicida, o controle apresentou o menor valor de MDA em comparação aos tratamentos inoculados, diferindo significativamente destes.

De forma geral, os resultados indicam que, no estágio vegetativo em solo arenoso, a inoculação com *B. inaquosorum* e *B. lata* não promoveu redução nos teores de MDA em relação ao controle sob condição de estresse herbicida. Esse padrão sugere que, nesse estágio, os microrganismos não exerceram efeito protetor mensurável sobre o dano oxidativo das plantas, uma vez que os níveis de peroxidação lipídica foram equivalentes entre os tratamentos inoculados e o controle com herbicida (Figura 6).

6.2 Solo argiloso

6.2.1 Estádio vegetativo

Avaliando o comprimento da parte aérea de plantas de amendoim durante o estágio vegetativo no solo argiloso, quando observado o comportamento dos tratamentos na presença do herbicida, *B. lata* proporcionou o maior valor, com média de aproximadamente 14,5 cm, diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (11,2 cm) e do controle (9,7 cm). *B. inaquosorum* e controle não diferiram entre si na presença do herbicida. Na ausência do herbicida, o controle apresentou o maior valor (14,2 cm), diferindo significativamente de *B. inaquosorum* e *B. lata*, que não diferiram entre si, com médias de aproximadamente 10,0 cm e 10,6 cm, respectivamente. Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* não proporcionou diferença significativa entre as condições, mantendo valores próximos a 11 cm. Para *B. lata*, a presença do herbicida resultou em maior comprimento, com diferença significativa em relação à ausência de herbicida, representando um incremento de aproximadamente 37%. Para o controle, o comportamento foi inverso: a ausência do herbicida resultou em comprimento aproximadamente 46% superior ao observado com a aplicação do herbicida (Figura 7)

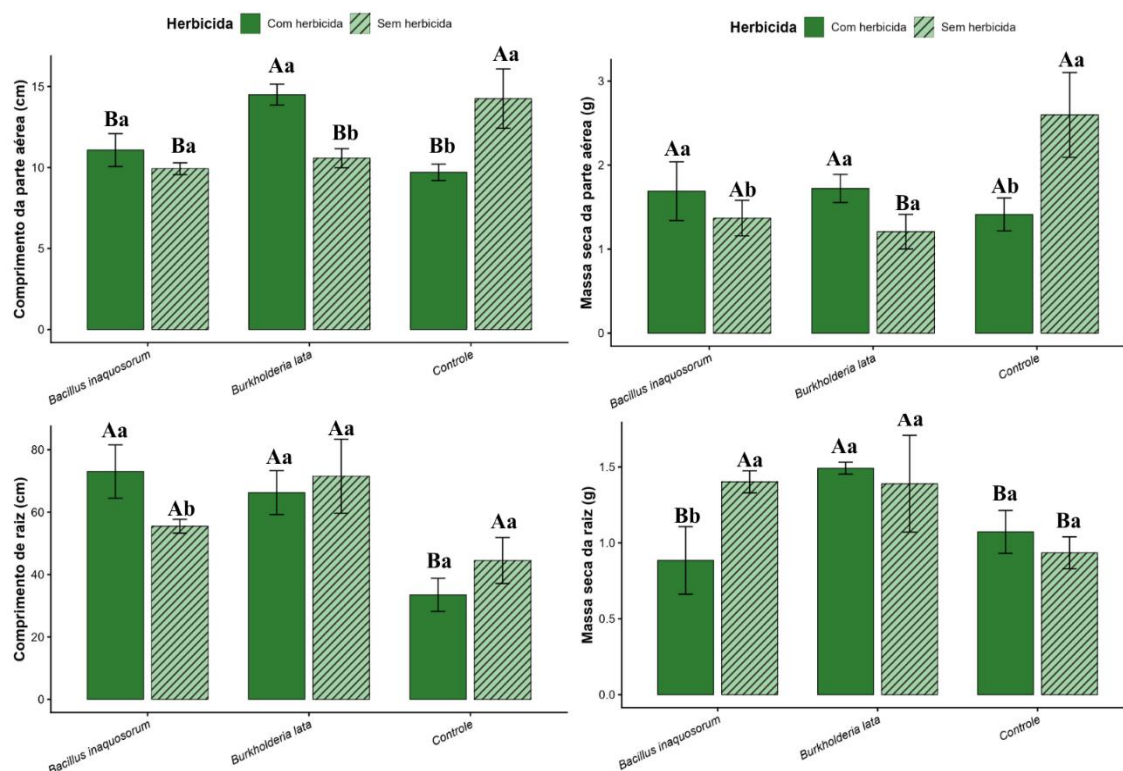


Figura 7. Gráfico das variáveis biométricas do amendoim no estágio vegetativo em solo argiloso.

Para a massa seca da parte aérea, na presença do herbicida, não houve diferença significativa entre os tratamentos, com médias próximas a 1,68 g, 1,70 g e 1,42 g para *B. inaquosorum*, *B. lata* e controle, respectivamente. Na ausência do herbicida, o controle apresentou o maior valor, com média de aproximadamente 2,62 g, diferindo significativamente de *B. lata* (1,22 g). *B. inaquosorum* na ausência do herbicida (1,38 g) não diferiu estatisticamente do controle nessa condição. Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* proporcionou diferença significativa entre as condições, sendo que a presença do herbicida resultou em maior massa seca aérea. *Burkholderia lata* não proporcionou diferença significativa entre as condições de herbicida para esta variável. Para o controle, a ausência do herbicida resultou em massa seca aproximadamente 85% superior à condição com herbicida, configurando a maior diferença interna entre tratamentos observada para essa variável (Figura 7).

Para o comprimento de raiz, na presença do herbicida, *B. inaquosorum* e *B. lata* não diferiram entre si, com médias de aproximadamente 73 cm e 66 cm, respectivamente, e ambos foram significativamente superiores ao controle, que registrou média de aproximadamente 34 cm. Na ausência do herbicida, não houve diferença significativa entre os tratamentos, com médias de aproximadamente 56 cm, 71 cm e 45 cm para *B.*

inaquosorum, *B. lata* e controle, respectivamente. Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* proporcionou diferença significativa, com a presença do herbicida resultando em comprimento de raiz aproximadamente 30% superior à condição sem herbicida. *B. lata* e o controle não apresentaram diferença significativa entre as condições de herbicida para esta variável (Figura 7).

Para a massa seca de raiz, na presença do herbicida, *B. lata* proporcionou o maior valor (1,50 g), diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (0,87 g) e do controle (1,09 g), que não diferiram entre si. Na ausência do herbicida, *B. inaquosorum* (1,38 g) e *B. lata* (1,38 g) não diferiram entre si e foram significativamente superiores ao controle (0,95 g). Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* proporcionou diferença significativa entre as condições, com a ausência do herbicida resultando em massa seca de raiz aproximadamente 59% superior à condição com herbicida. *B. lata* e o controle não apresentaram diferença significativa entre as condições de herbicida para esta variável (Figura 7).

O primeiro plano fatorial da Análise de Componentes Principais (PCA) para o solo argiloso explicou 76,6% da variância total, sendo 40,2% atribuídos ao PC1 e 36,4% ao PC2. A distribuição dos tratamentos revelou maior sobreposição entre os grupos com e sem herbicida em comparação ao solo arenoso, indicando menor intensidade dos efeitos fitotóxicos nesse tipo de solo (Figura 8).

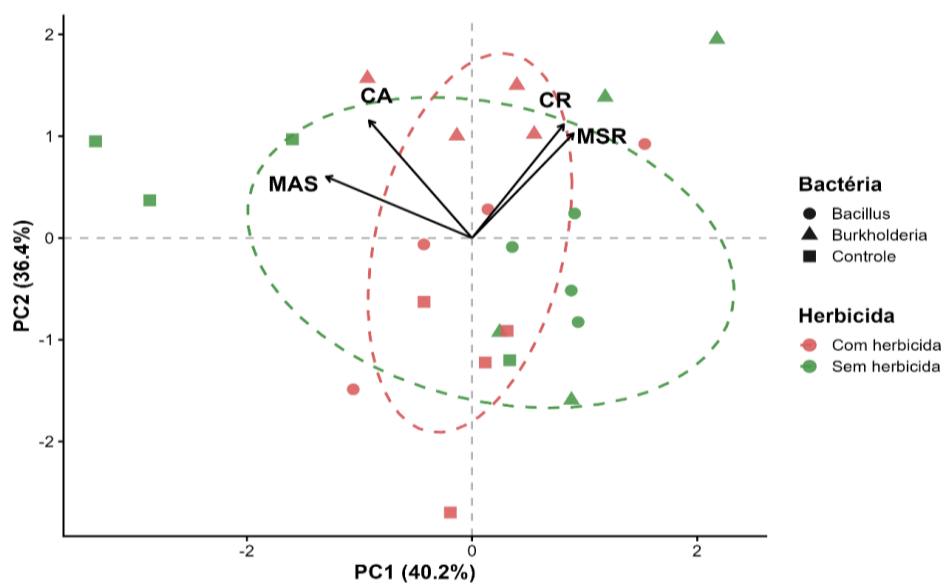


Figura 8. PCA das variáveis biométricas no estágio vegetativo em solo argiloso.

A análise visual dos vetores sugere que MAS apresentou orientação predominantemente associada ao lado negativo do PC1, com possível associação ao tratamento controle sem herbicida, cujos pontos se concentraram nessa região do gráfico. Por outro lado, CR e MSR aparentam estar orientados para o lado positivo do PC2, com possível associação ao tratamento *B. lata* com herbicida, cujos pontos se distribuíram predominantemente nessa região, sugerindo que essa estirpe pode ter favorecido o desenvolvimento radicular mesmo sob condição de estresse. Em contraste, o controle com herbicida concentrou-se no lado negativo do PC2, região associada a menores valores dessas variáveis radiculares, indicando maior impacto do imazapique sobre o sistema radicular na ausência de inoculação. CA apresentou orientação intermediária, com associação parcial tanto às variáveis radiculares quanto à massa aérea (Figura 8).

De forma geral, a maior sobreposição entre os tratamentos no solo argiloso sugere que esse ambiente proporcionou maior estabilidade fisiológica às plantas, provavelmente em função da maior capacidade de adsorção do herbicida pelos coloides do solo, reduzindo sua biodisponibilidade. Ressalta-se, contudo, que a confirmação precisa das associações entre variáveis e tratamentos requer a consulta às cargas fatoriais da PCA, o que deve ser considerado em análises futuras (Figura 8).

A análise de agrupamento hierárquico, realizada com base nas médias dos tratamentos por distância euclidiana e método Ward.D2, resultou na formação de dois grupos distintos para o solo argiloso na fase vegetativa (Figura 9).

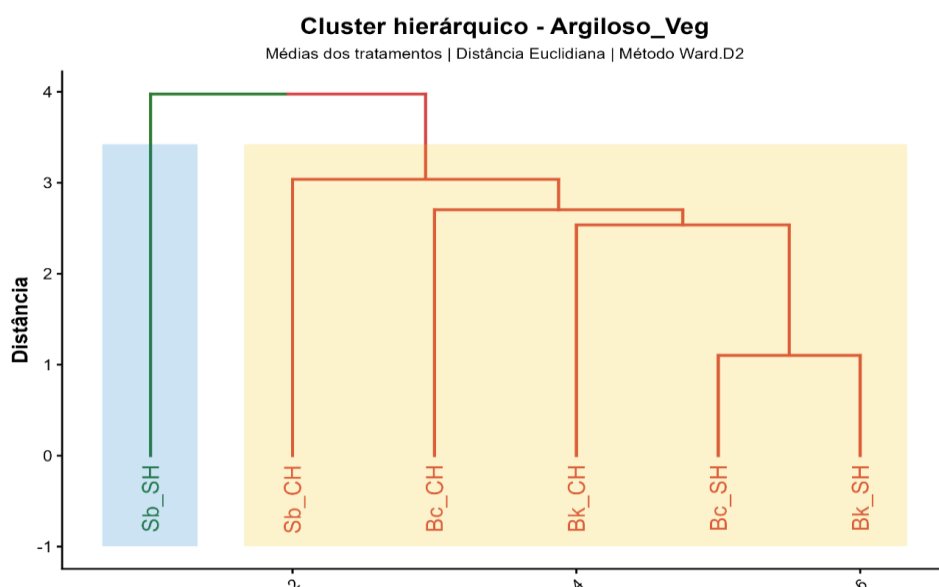


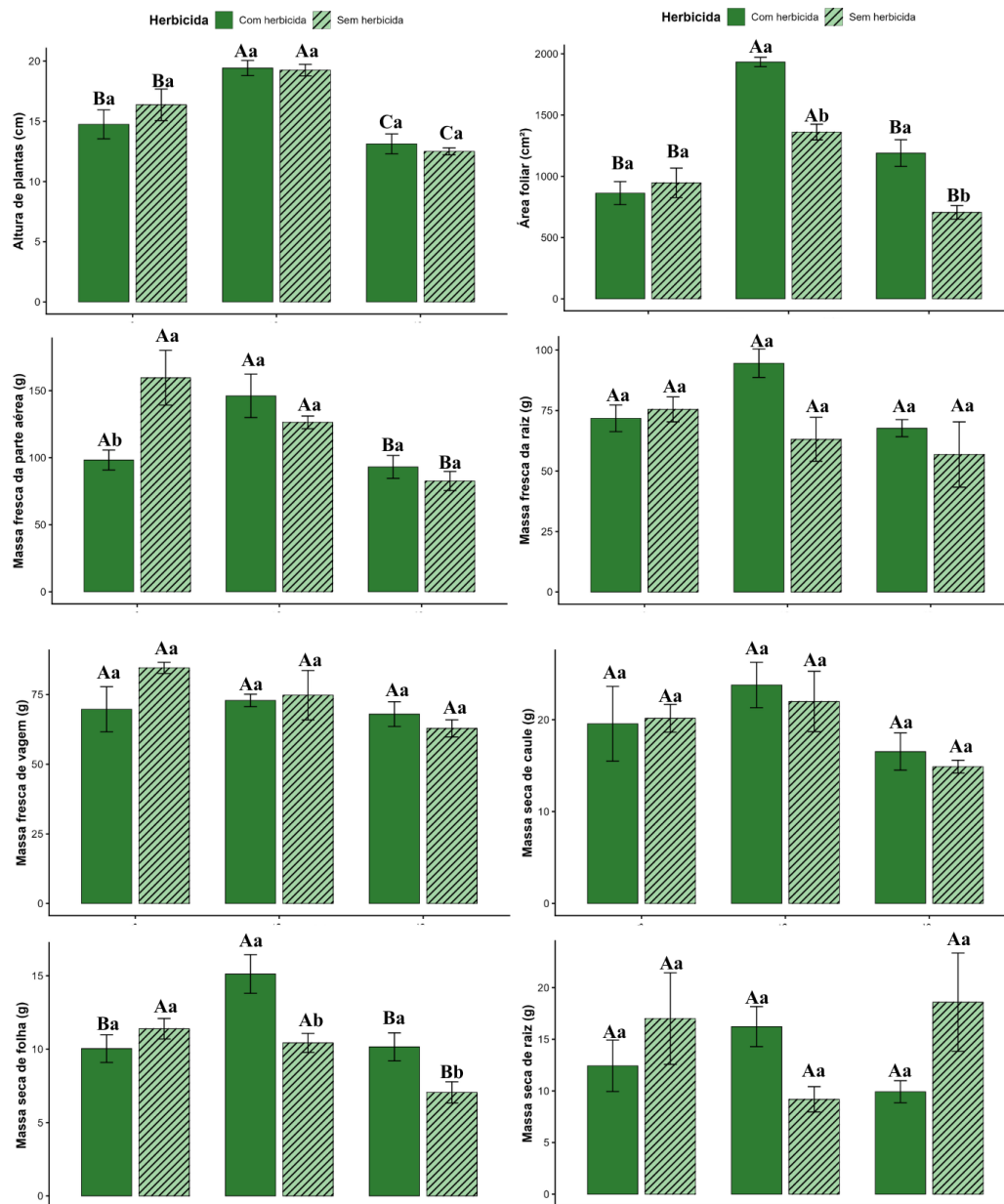
Figura 9. Análise de agrupamento hierárquico (Cluster) no estágio vegetativo em solo argiloso.

O primeiro grupo, representado pelo fundo azul, é composto exclusivamente pelo tratamento controle sem herbicida (Sb_SH), o qual se isolou dos demais com distância de fusão de aproximadamente 4,0 em relação ao segundo grupo. Esse isolamento indica que o perfil multivariado do controle sem herbicida diferiu substancialmente de todos os demais tratamentos avaliados. (Figura 9).

O segundo grupo, representado pelo fundo amarelo, reuniu os cinco tratamentos restantes: controle com herbicida (Sb_CH), *B. inaquosorum* com herbicida (Bc_CH), *B. lata* com herbicida (Bk_CH), *B. inaquosorum* sem herbicida (Bc_SH) e *B. lata* sem herbicida (Bk_SH). Dentro deste grupo, observou-se uma estrutura hierárquica de subagrupamentos. O controle com herbicida (Sb_CH) proporcionou o maior isolamento interno, sendo o primeiro a se fundir com os demais dentro do grupo, em distância de aproximadamente 3,0. Em seguida, Bc_CH se associou a esse subconjunto em distância de aproximadamente 2,75, seguido por Bk_CH em distância de aproximadamente 2,6. Os tratamentos Bc_SH e Bk_SH formaram o par mais similar de todo o dendrograma, com fusão interna a uma distância de aproximadamente 1,1, unindo-se posteriormente aos demais tratamentos do grupo em distância de aproximadamente 2,6 (Figura 9).

6.2.2 Estádio reprodutivo

Para a fase reprodutiva do solo argiloso, as variáveis massa fresca da raiz, massa fresca de vagem, massa seca de caule, massa seca de raiz, massa seca de vagem e número total de vagens não apresentaram diferenças significativas em nenhuma das comparações realizadas, nem entre os tratamentos bacterianos dentro de cada condição de herbicida, nem entre as condições de herbicida dentro de cada tratamento (Figura 10).



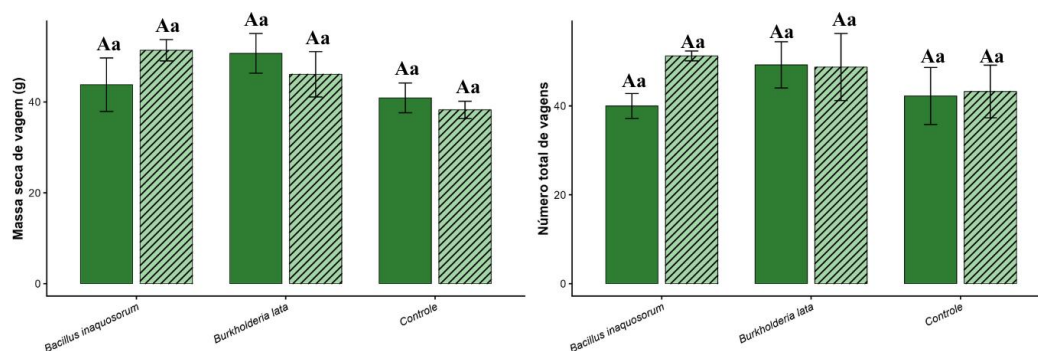


Figura 10. Gráficos das variáveis biométricas do amendoim no estágio reprodutivo em solo argiloso.

No estágio reprodutivo em solo argiloso, os resultados de maior destaque foram observados para altura de plantas, área foliar, massa fresca da parte aérea e massa seca de folha, variáveis nas quais a inoculação bacteriana promoveu respostas mais expressivas, especialmente na presença do herbicida.

Para a altura de plantas, *B. lata* proporcionou os maiores valores tanto na presença (20 cm) quanto na ausência do herbicida, diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (15 cm), que por sua vez diferiu significativamente do controle (13 cm). Nenhum dos tratamentos apresentou diferença significativa entre as condições de herbicida para a altura de plantas (Figura 10).

Para a área foliar, *B. lata* se destacou como o melhor tratamento em ambas as condições. Na presença do herbicida, *B. lata* proporcionou o maior valor (2.000 cm²), diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (900 cm²) e do controle (1.200 cm²), que não diferiram entre si. Na ausência do herbicida, *B. lata* (1.400 cm²) foi superior a *B. inaquosorum* (1.000 cm²) e ao controle (700 cm²), sendo esses dois últimos estatisticamente equivalentes. Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* não apresentou diferença significativa entre as condições. Para *B. lata* e o controle, a presença do herbicida resultou em área foliar significativamente superior à condição sem herbicida, com incrementos de aproximadamente 43% e 71%, respectivamente (Figura 10).

Para a massa fresca da parte aérea, tanto na presença quanto na ausência do herbicida, *B. inaquosorum* e *B. lata* não diferiram entre si e foram significativamente superiores ao controle, que apresentou os menores valores em ambas as condições (97 g com herbicida e 87 g sem herbicida). Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. lata* e o controle não apresentaram diferença significativa entre as condições. Para *B. inaquosorum*, a ausência do herbicida resultou em massa fresca da

parte aérea aproximadamente 60% superior à condição com herbicida, configurando diferença significativa interna (Figura 10).

Para a massa seca de folha, *B. lata* foi o melhor tratamento na presença do herbicida, proporcionando o maior valor (15 g) e diferindo significativamente de *B. inaquosorum* (10 g) e do controle (10 g), que não diferiram entre si. Na ausência do herbicida, *B. inaquosorum* (12 g) e *B. lata* (10,5 g) não diferiram entre si e foram significativamente superiores ao controle (8,5 g). Quando avaliado o fator herbicida dentro de cada tratamento, *B. inaquosorum* não apresentou diferença significativa entre as condições. Para *B. lata* e o controle, a presença do herbicida resultou em maior massa seca de folha em relação à ausência, configurando diferença significativa dentro de cada um desses tratamentos (Figura 10).

6.2.3 Análises MDA

Os teores de MDA não apresentaram diferenças significativas entre as condições de herbicida nos tratamentos inoculados com *B. inaquosorum* (2,2 $\mu\text{mol L}^{-1}$ com herbicida e 2,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ sem herbicida) e *B. lata* (2,1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ com herbicida e 2,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ sem herbicida), indicando que a presença do imazapique não alterou o nível de peroxidação lipídica nas plantas inoculadas (Figura 11).

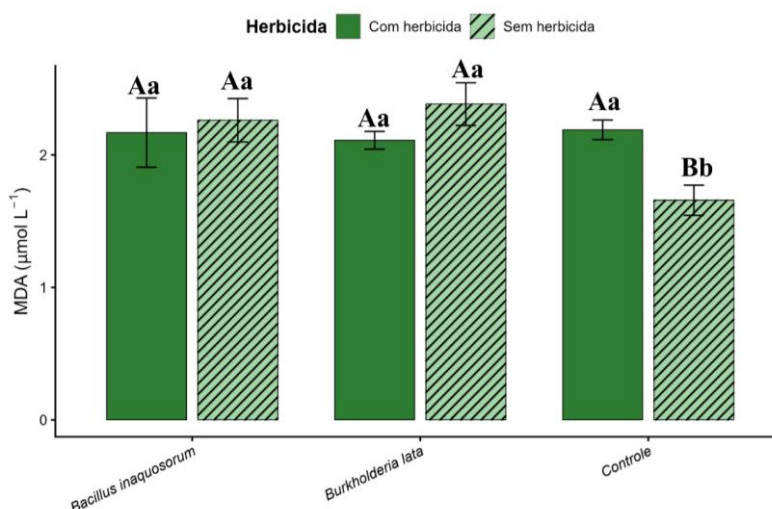


Figura 11. Teores de malondialdeído (MDA) em plantas de amendoim cultivadas em solo argiloso.

No tratamento controle, observou-se diferença significativa entre as condições de herbicida, com maior teor de MDA na presença do herbicida (2,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$) em relação à ausência (1,7 $\mu\text{mol L}^{-1}$). Adicionalmente, na ausência de herbicida, o controle apresentou

o menor valor de MDA em comparação aos tratamentos inoculados, diferindo significativamente destes.

De forma geral, os resultados indicam que, no solo argiloso, a inoculação com *B. inaquosorum* e *B. lata* não promoveu redução nos teores de MDA em relação ao controle sob condição de estresse herbicida. Esse padrão, semelhante ao observado no solo arenoso, sugere que os microrganismos avaliados não exerceram efeito protetor mensurável sobre o dano oxidativo das plantas, uma vez que os níveis de peroxidação lipídica foram equivalentes entre os tratamentos inoculados e o controle com herbicida em ambos os tipos de solo (Figura 11).

7 DISCUSSÃO

O imazapique atua pela inibição da enzima acetohidroxiácido sintase (AHAS), responsável pela biossíntese dos aminoácidos de cadeia ramificada valina, leucina e isoleucina. A inibição dessa enzima compromete a síntese proteica e o metabolismo primário das plantas sensíveis, resultando em paralização do crescimento nos meristemas apicais e radiculares. Dessa forma, alterações no crescimento vegetal sob a presença do herbicida eram esperadas, como a redução do crescimento da parte aérea e do sistema radicular, a diminuição no acúmulo de biomassa e o aumento da peroxidação lipídica decorrente da geração de espécies reativas de oxigênio, conforme descrito por Mittler (2002) e Daramola *et al.* (2024).

Em solos arenosos, a menor capacidade de retenção de compostos orgânicos e o reduzido teor de matéria orgânica podem ter favorecido maior disponibilidade do herbicida na solução do solo, aumentando o estresse imposto às plantas (Marinho *et al.*, 2018). A baixa capacidade adsortiva desse tipo de solo reduz a interação entre as moléculas do herbicida e as partículas do solo, mantendo maior fração do ingrediente ativo em forma biodisponível para absorção radicular. Esse comportamento ajuda a explicar a maior diferença observada entre os tratamentos inoculados e o controle nesse ambiente, especialmente no comprimento da parte aérea durante o estágio vegetativo. Ramezani *et al.* (2009) evidenciam que a concentração e a disponibilidade de imidazolinonas na solução do solo variam conforme o tipo de solo, o que permite inferir que solos de textura mais leve podem apresentar maior biodisponibilidade do herbicida, intensificando seus efeitos sobre as plantas cultivadas.

Por outro lado, no solo argiloso, a maior presença de coloides minerais e orgânicos provavelmente reduziu a biodisponibilidade do herbicida, tornando as respostas vegetais

mais homogêneas entre os tratamentos. A maior superfície específica das partículas argilosas favorece a adsorção de moléculas orgânicas, incluindo herbicidas do grupo das imidazolinonas, reduzindo a fração disponível na solução do solo. Solos com menor teor de argila e matéria orgânica tendem a apresentar maior mobilidade e disponibilidade desses herbicidas, aumentando o risco de dano a culturas sensíveis e de carryover (Gehrke *et al.*, 2021). Esse padrão foi observado na análise de componentes principais, na qual houve maior sobreposição entre os tratamentos no solo argiloso, indicando menor diferenciação fisiológica entre as condições avaliadas nesse ambiente. Do ponto de vista agrônomo, esses resultados reforçam que o risco de fitotoxicidade associado ao imazapique tende a ser mais relevante em solos arenosos, predominantes em parte das áreas produtoras de amendoim da Alta Mogiana (Godoy *et al.*, 2017).

No solo arenoso, durante o estágio vegetativo, as plantas dos tratamentos inoculados mantiveram maior comprimento da parte aérea mesmo sob aplicação do herbicida, enquanto as do controle apresentaram redução mais acentuada. Esse comportamento sugere que *Bacillus inaquosorum* e *Burkholderia lata* podem ter contribuído para atenuar os efeitos inibitórios do imazapique sobre o crescimento vegetal. Uma possível explicação envolve a produção de compostos promotores de crescimento, como ácido indolacético, giberelinas e outros metabólitos associados à promoção do desenvolvimento vegetal, frequentemente descritos para bactérias promotoras de crescimento vegetal (Gomes *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2017). Esses compostos podem atuar estimulando a divisão e a elongação celular, contribuindo para a manutenção do crescimento mesmo sob condições de limitação metabólica impostas pelo herbicida. Estudo recente caracterizando essas bactérias demonstrou sua capacidade de promover respostas positivas no desenvolvimento do amendoim, incluindo estímulo ao crescimento vegetativo e modulação fisiológica sob condições de estresse, reforçando a hipótese de que os efeitos observados estejam associados à atividade metabólica dessas bactérias na rizosfera (Martins *et al.*, 2026).

Ainda assim, o maior crescimento longitudinal não foi acompanhado por aumento proporcional da biomassa aérea, sugerindo que, sob estresse causado pelo imazapique, a planta manteve a elongação celular sem equivalente incremento na produção de matéria seca. Esse desacoplamento entre crescimento estrutural e acúmulo de biomassa indica que o herbicida pode ter comprometido processos metabólicos relacionados à síntese de compostos de reserva, mesmo sem impedir completamente a expansão celular. Esse comportamento é compatível com respostas fisiológicas observadas em condições de

estresse moderado, nas quais a manutenção do crescimento estrutural ocorre mesmo sob limitação metabólica e redução da síntese proteica (Mittler, 2002).

As respostas do sistema radicular evidenciaram diferenças importantes entre as estirpes avaliadas. Em solo arenoso sob aplicação de imazapique, *Burkholderia lata* proporcionou maiores valores de comprimento e biomassa radicular em comparação aos demais tratamentos, indicando maior capacidade de manutenção do desenvolvimento radicular sob estresse herbicida. Estudo recente envolvendo os isolados utilizados neste trabalho demonstrou que ambas as bactérias apresentam características associadas à promoção de crescimento vegetal, incluindo produção de fitormônios, solubilização de fosfato, síntese de exopolissacarídeos e elevada capacidade de colonização rizosférica, fatores diretamente relacionados à maior tolerância vegetal sob condições de estresse abiótico (Martins *et al.*, 2026). A produção de exopolissacarídeos pode melhorar a agregação do solo e a retenção de água na região rizosférica, favorecendo o funcionamento radicular em solos arenosos, onde a baixa retenção hídrica pode representar fator adicional de estresse. A solubilização de nutrientes, por sua vez, amplia a disponibilidade de fósforo e outros elementos essenciais ao metabolismo vegetal, contribuindo para a manutenção das funções radiculares mesmo sob presença do herbicida. A interação rizosférica promovida por espécies do gênero *Burkholderia* pode contribuir para maior eficiência na absorção de água e nutrientes e para a manutenção da integridade fisiológica das raízes sob condições de estresse (Coenye; Vandamme, 2003). Embora os mecanismos envolvidos não tenham sido avaliados diretamente neste estudo, não se pode descartar a possibilidade de interação indireta dessas bactérias com a dinâmica do herbicida na rizosfera, reduzindo parcialmente seus efeitos fitotóxicos próximos ao sistema radicular.

No estágio reprodutivo, observou-se no solo argiloso um padrão consistente de maior porte de plantas nos tratamentos inoculados, principalmente com *B. lata*, tanto na presença quanto na ausência do herbicida, sugerindo que os efeitos promotores de crescimento não estiveram exclusivamente relacionados à mitigação do estresse fitotóxico. Esse comportamento indica que as bactérias exerceram ação promotora de crescimento de forma contínua ao longo do ciclo da cultura, independentemente da condição de estresse imposta pelo herbicida. Esse padrão pode estar associado à ação contínua de mecanismos de promoção de crescimento vegetal exercidos pelas estirpes bacterianas, incluindo produção de fitormônios como auxinas, solubilização de fosfato e outras atividades relacionadas à melhoria da disponibilidade de nutrientes na rizosfera

(Martins *et al.*, 2026; Tejera-Hernández *et al.*, 2011). A área foliar reforçou essa tendência, principalmente em *B. lata*, indicando maior desenvolvimento vegetativo ao longo do ciclo, o que pode estar relacionado à maior disponibilidade de nutrientes e fitormônios proporcionada pela atividade bacteriana na rizosfera, favorecendo a expansão foliar e, conseqüentemente, a capacidade fotossintética da planta (Martins *et al.*, 2026; Benincasa, 2003).

No solo arenoso, *B. inaquosorum* apresentou redução de área foliar na presença do herbicida, sem diferir dos demais tratamentos quanto ao número total de vagens, o qual também não foi influenciado pela aplicação do imazapique. Esse resultado indica que, embora o herbicida tenha afetado o crescimento vegetativo de forma localizada, a capacidade produtiva das plantas em termos de número de vagens foi mantida de forma semelhante entre os tratamentos, sugerindo que o estresse imposto pelo imazapique não foi suficiente para comprometer o potencial reprodutivo da cultura nas condições avaliadas, independentemente da inoculação bacteriana.

Os teores de malondialdeído (MDA), utilizados como indicador de peroxidação lipídica, revelaram que a concentração desse marcador foi estatisticamente semelhante entre os tratamentos inoculados e o controle na presença do herbicida, em ambos os tipos de solo. Esse resultado indica que a inoculação com *B. inaquosorum* e *B. lata* não promoveu redução do dano oxidativo nas plantas sob estresse herbicida de forma mensurável nas condições avaliadas. A única diferença significativa observada ocorreu no tratamento controle, no qual a presença do herbicida resultou em maiores teores de MDA em relação à ausência, sugerindo que o imazapique induziu estresse oxidativo nas plantas não inoculadas. Nos tratamentos inoculados, a ausência de variação significativa entre as condições de herbicida pode indicar que as bactérias mantiveram um nível basal de atividade metabólica nas plantas, sem, contudo, exercer efeito protetor mensurável sobre a peroxidação lipídica. A possível indução de enzimas antioxidantes como superóxido dismutase, catalase e peroxidases, frequentemente relatada para interações entre plantas e bactérias promotoras de crescimento vegetal, não pôde ser confirmada neste estudo, uma vez que essas variáveis não foram avaliadas diretamente (Radwan *et al.*, 2019; Dai *et al.*, 2019). Dessa forma, essa interpretação deve ser considerada como hipótese fisiológica compatível com os resultados observados, a ser investigada em estudos futuros.

A análise de agrupamento hierárquico permitiu visualizar de forma integrada os padrões fisiológicos obtidos nos diferentes tratamentos. No solo arenoso, o isolamento do

controle com herbicida indica que a ausência de inoculação resultou em perfil fisiológico distinto dos demais tratamentos sob condição de estresse, evidenciando o impacto da ausência de inoculação bacteriana sobre o conjunto das variáveis avaliadas. Em contraste, os tratamentos inoculados apresentaram maior proximidade multivariada entre si, independentemente da presença do herbicida, sugerindo que a inoculação conferiu maior estabilidade fisiológica às plantas sob diferentes condições. No solo argiloso, o padrão foi menos contrastante, em função da menor intensidade do estresse fitotóxico nesse ambiente, resultando em maior sobreposição entre os grupos. De forma geral, *Burkholderia lata* demonstrou respostas mais associadas à preservação do sistema radicular e da área foliar, enquanto *B. inaquosorum* proporcionou maior destaque em características relacionadas ao crescimento aéreo. Essa diferença de comportamento entre as estirpes sugere que elas podem atuar por mecanismos complementares, o que aponta para potencial interessante em estudos futuros envolvendo co-inoculação, especialmente em condições de campo e em diferentes tipos de solo.

8 CONCLUSÃO

Bacillus inaquosorum e *Burkholderia lata* promoveram melhora no desenvolvimento vegetativo e radicular de plantas de amendoim, com respostas mais expressivas em solo arenoso, onde a maior biodisponibilidade do imazapique intensificou o estresse fitotóxico.

No solo argiloso, *Burkholderia lata* destacou-se na promoção da altura de plantas e da área foliar, tanto na presença quanto na ausência do herbicida, sugerindo efeito promotor de crescimento independente da condição de estresse.

Os teores de malondialdeído foram estatisticamente semelhantes entre os tratamentos inoculados e o controle sob aplicação do herbicida, em ambos os tipos de solo, indicando que as bactérias avaliadas não reduziram o dano oxidativo de forma mensurável nas condições estudadas.

A utilização de *B. inaquosorum* e *B. lata* representa uma estratégia complementar ao controle químico de plantas daninhas na cultura do amendoim, com maior potencial de contribuição em solos arenosos, onde os efeitos fitotóxicos do imazapique tendem a ser mais intensos.

9 REFERÊNCIAS

- AGROFIT. Sistema de agrotóxicos fitossanitários. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 20 fev. 2026.
- ALVINO, F. C. G. *et al.* Seletividade de herbicidas aplicados em pré-emergência na cultura do amendoim. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 409–417, 2011.
- AZEVEDO, R. A. *et al.* Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 104, n. 2, p. 280–292, 1998.
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, **The Hague**, v. 39, n. 1, p. 205–207, 1973.
- BENINCASA, M. M. P. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. Jaboticabal: **FUNEP**, 2003.
- BOOTE, K. J. Growth stages of peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Peanut Science**, v. 9, n. 1, p. 35–40, 1982.
- BRADFORD, M. M. Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 71, n. 1-2, p. 248–254, 1976.
- 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**, Copenhagen, v. 83, n. 3, p. 463–468, 1991.
- CARREGA, W. C. *et al.* Interferência de plantas daninhas na cultura do amendoim. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 40, e022263589, 2022. DOI: 10.1590/S0100-83582022400100073.
- COENYE, T.; VANDAMME, P. Diversity and significance of Burkholderia species occupying diverse ecological niches. *Environmental Microbiology*, **Oxford**, v. 5, n. 9, p. 719–729, 2003. DOI: 10.1046/j.1462-2920.2003.00471.x.
- COHN, F. Untersuchungen über Bakterien. **Beiträge zur Biologie der Pflanzen**, v. 1, p. 127–224, 1872.
- DAI, L. *et al.* Effect of drought stress and developmental stages on microbial community structure and diversity in peanut rhizosphere soil. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 9, p. 2265, 2019.
- DIAS, T. C. S. *et al.* Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura do amendoim. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 413–420, 2005.

- ESTRADA-DE LOS SANTOS, P. *et al.* Phylogenetic analysis of Burkholderia species by multilocus sequence analysis. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 67, n. 11, p. 5100–5110, 2001.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011.
- GAVIOLLI, R. L. Interferência de plantas daninhas na cultura do amendoim (*Arachis hypogaea* L.). Jaboticabal: FCAV/UNESP, 1985.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutase: occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–314, 1977.
- GODOY, I. J. *et al.* IAC OL 5: new high oleic runner peanut cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 17, n. 2, p. 295–298, 2017.
- GODOY, I. J. *et al.* Cultura do amendoim: recomendações técnicas para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico, 2017.
- GOMES, E. A. *et al.* Microrganismos promotores do crescimento de plantas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016.
- GREGORY, W. C.; KRAPOVICKAS, A.; GREGORY, M. P. Structure, variation, evolution and classification in *Arachis*. In: SUMMERFIELD, R. J.; BUNTING, A. H. (ed.). **Advances in Legume Science**. London: Royal Botanic Gardens, Kew, 1980. p. 469–481.
- HAUSER, E. W.; PARHAM, W. E. Periods of weed competition in peanuts. **Weed Science**, Champaign, v. 23, n. 3, p. 223–226, 1975.
- IBGE. Produção agropecuária: amendoim. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/amendoim/br>. Acesso em: 2 fev. 2026.
- JAKOBSEN, M. *et al.* The effect of inoculum age and solid versus liquid propagation on inoculum quality of an industrial *Bacillus licheniformis* strain. **FEMS Microbiology Letters**, v. 236, n. 1, p. 145–151, 2004.
- JOLLIFFE, I. T. Principal Component Analysis. 2. ed. New York: Springer, 2002.
- KRAPOVICKAS, A.; GREGORY, W. C. Taxonomía del género *Arachis* (Leguminosae). Argentina: Bonplandia, 1994.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. Numerical Ecology. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, A. S. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: **ABPPF**, 1989.
- MARINHO, M. *et al.* Sorption-desorption behavior of imazethapyr and imazapic on six Brazilian soils. **Planta Daninha**, v. 36, 2018. DOI: 10.1590/s0100-83582018360100140.

- MARTINS, H. L. *et al.* Bacteria in peanut nodules under herbicide and non-herbicide management: isolation, identification, and screening of plant growth-promoting traits. **Microorganisms**, v. 14, n. 10, p. 1004, 2026. DOI: 10.3390/microorganisms14051004.
- MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 7, n. 9, p. 405–410, 2002.
- NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C. A. O amendoim: tecnologia de produção. Botucatu: **FEPAF**, 2011.
- NANNIPIERI, P. *et al.* Microbial diversity and soil functions. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 68, n. 1, p. 12–26, 2017.
- R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- RAMEZANI, M. *et al.* Improved extraction and clean-up of imidazolinone herbicides from soil solutions using different solid-phase sorbents. **Journal of Chromatography A**, Amsterdam, v. 1216, n. 26, p. 5092–5100, 2009.
- SAHA, A. *et al.* Influence of imazethapyr and quizalofop-p-ethyl application on microbial biomass and enzymatic activity in peanut grown soil. **Environmental Science and Pollution Research**, 2016.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TEJERA-HERNÁNDEZ, B.; ROJAS-BADÍA, M. M.; HEYDRICH-PÉREZ, M. Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, v. 42, p. 131–138, 2011.
- USDA. Oilseeds: world markets and trade. Washington, DC: **USDA**, 2025.
- VALLS, J. F. M.; SIMPSON, C. E. New species of *Arachis* L. (Leguminosae) from Brazil, Paraguay and Bolivia. *Bonplandia, Argentina*, v. 14, p. 35–64, 2005.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963.
- WANG, Y. *et al.* *Bacillus*: a biological tool for crop improvement through biomolecular changes in adverse environments. **Frontiers in Physiology**, v. 8, p. 667, 2017.
- ZANARDO, H. G. *et al.* Herbicide selectivity in peanut cultivars. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 8, p. 447, 2018.