



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

BRUNA SOUZA REIS

**AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DE ARSÊNIO E CROMO EM
MICRORGANISMOS UTILIZADOS COMO BIOINSUMOS NA AGRICULTURA**

Uberlândia

2026

BRUNA SOUZA REIS

**AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DE ARSÊNIO E CROMO EM
MICRORGANISMOS UTILIZADOS COMO BIOINSUMOS NA
AGRICULTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós- Graduação em Agronomia da
Universidade Federal de Uberlândia,
como exigência parcial para obtenção do
título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Adão de Siqueira
Ferreira.

**Uberlândia
2026**

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R375a
2026 Reis, Bruna Souza, 1999-
Avaliação da toxicidade de arsênio e cromo em microrganismos
utilizados como bioinsumos na agricultura [recurso eletrônico] / Bruna
Souza Reis. -- 2026.

Orientador: Adão de Siqueira Ferreira.
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.11031>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Ferreira, Adão de Siqueira, 1969-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Agronomia. III. Título.

CDU: 631

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Agronomia
Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP
38400-902
Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 007/2026, PPGAGRO				
Data:	Vinte e três de maio de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:25
Matrícula do Discente:	12412AGR004				
Nome do Discente:	Bruna Souza Reis				
Título do Trabalho:	Avaliação da toxicidade de arsênio e cromo em microrganismos utilizados como bioinsumos na agricultura				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura				

Reuniu-se na sala 4K 238 - Campus Umuarama, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Araina Hulmann Batista - UFU; Jonny Yokosawa - UFU; Maria Rita de Cássia Campos - UFCAT e Adão de Siqueira Ferreira - UFU - orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. Adão de Siqueira Ferreira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA

Essa dissertação possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? () SIM NÃO (x)

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Adão de Siqueira Ferreira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2026, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonny Yokosawa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/05/2026, às 10:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Araína Hulmann Batista, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/05/2026, às 18:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Rita de Cássia Campos, Usuário Externo**, em 27/05/2026, às 18:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7339269** e o código CRC **CC6A0B67**.

Referência: Processo nº 23117.033969/2026-01

SEI nº 7339269

BRUNA SOUZA REIS

**AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DE ARSÊNIO E CROMO EM
MICRORGANISMOS UTILIZADOS COMO BIOINSUMOS NA
AGRICULTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós- Graduação em Agronomia da
Universidade Federal de Uberlândia,
como exigência parcial para obtenção do
título de Mestre em Agronomia.

APROVADA em: ____/____/____

Profa. Dra. Araina Hulmann Batista

UFU

Prof. Dr. Jonny Yokosawa

UFU

Profa. Dra. Maria Rita de Cássia Campos

UFCAT

Prof. Dr. Adão de Siqueira Ferreira
UFU
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela força e por me permitir chegar até aqui, mesmo diante dos desafios.

À minha mãe, Maria, pelo cuidado, incentivo diário e pelo amor incondicional, por ser meu maior exemplo de força.

Ao meu pai, Everaldo, pelo amor incondicional e por sempre acreditar em mim.

À minha irmã, Rafaela, pela amizade, companheirismo e por estar sempre ao meu lado.

Ao meu namorado, Gerson, pelo apoio e companheirismo durante toda essa jornada.

À FAPEMIG e à U.S. Borax, pelo apoio financeiro, fundamental para o desenvolvimento deste estudo.

À Meliza, coordenadora do laboratório, pela disponibilidade, pelo apoio e por toda a ajuda na condução dos ensaios.

Ao meu orientador, Adão, pela orientação, parceria, confiança e por todos os ensinamentos compartilhados ao longo deste trabalho.

À instituição de ensino, Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar este trabalho e contribuição para a minha formação acadêmica.

RESUMO

A contaminação do solo por metais e metaloides representa um importante fator de estresse para microrganismos de interesse agrícola, podendo comprometer sua sobrevivência e seu estabelecimento em sistemas produtivos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos tóxicos do arsênio, em duas diferentes formas químicas distintas, sobre o crescimento e a viabilidade celular de microrganismos utilizados como bioinsumos, bem como compará-los aos provocados pelo cromo. Foram avaliados os microrganismos *Azospirillum brasilense* Abv06, *Bacillus aryabhatai* CMAA 1363, *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 e *Saccharomyces cerevisiae*, submetidos a diferentes concentrações de arsenito, arsenato e cromo hexavalente em ensaios conduzidos *in vitro*. O crescimento microbiano foi avaliado pela densidade óptica a 600 nm (OD₆₀₀), e a viabilidade celular foi determinada pela contagem de unidades formadoras de colônias (UFC). Os dados de crescimento foram ajustados por regressão não linear utilizando o modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), o que permitiu caracterizar diferentes níveis de resposta dos microrganismos às concentrações testadas. Os resultados demonstraram que a toxicidade variou em função da forma química do contaminante, da concentração, do tempo de exposição e das características de cada microrganismo. O arsenato apresentou baixa toxicidade para a maioria dos microrganismos avaliados, enquanto o arsenito promoveu maior redução do crescimento e, em determinadas condições, elevada mortalidade celular, destacando-se a maior sensibilidade de *B. japonicum*. Os demais microrganismos apresentaram respostas variáveis ao arsenito em função da concentração e do tempo de exposição. O cromo por sua vez, demonstrou maior toxicidade promovendo forte inibição do crescimento e elevada mortalidade em parte dos microrganismos avaliados. A análise conjunta da densidade óptica e da contagem de UFC demonstrou que a redução do crescimento nem sempre esteve associada à perda imediata da viabilidade celular, indicando a ocorrência de respostas subletais durante a exposição aos contaminantes. Portanto, os resultados evidenciam que a resposta de microrganismos de interesse agrícola ao arsênio e ao cromo depende da forma química do contaminante e das características biológicas de cada organismo. Esses achados destacam a importância de considerar tanto o crescimento quanto a viabilidade celular na avaliação da tolerância microbiana em condições de contaminação.

Palavras-chave: arsênio; cromo; toxicidade; microrganismos; bioinoculantes; crescimento microbiano.

ABSTRACT

Soil contamination by metals and metalloids represents an important stress factor for microorganisms of agricultural interest, potentially compromising their survival and establishment in agricultural systems. In this context, the present study aimed to evaluate the toxic effects of arsenic, in two distinct chemical forms, on the growth and cell viability of microorganisms used as bioinputs, as well as to compare these effects with those caused by chromium. The microorganisms *Azospirillum brasilense* Abv06, *Bacillus aryabhatai* CMAA 1363, *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079, and *Saccharomyces cerevisiae* were evaluated under different concentrations of arsenite, arsenate, and hexavalent chromium in *in vitro* assays. Microbial growth was assessed by measuring optical density at 600 nm (OD₆₀₀), while cell viability was determined by colony-forming unit (CFU) counts. Growth data were fitted using nonlinear regression with the four-parameter log-logistic model (LL.4), which allowed the characterization of different response levels of the microorganisms to the tested concentrations. The results demonstrated that toxicity varied according to the chemical form of the contaminant, its concentration, exposure time, and the characteristics of each microorganism. Arsenate showed low toxicity to most of the microorganisms evaluated, whereas arsenite caused a greater reduction in growth and, under certain conditions, high cell mortality, with *B. japonicum* showing particularly high sensitivity. The other microorganisms exhibited variable responses to arsenite depending on concentration and exposure time. Chromium, in turn, exhibited more severe toxicity, causing strong growth inhibition and high mortality in some of the microorganisms evaluated. The combined analysis of optical density and CFU counts demonstrated that reduced growth was not always associated with an immediate loss of cell viability, indicating the occurrence of sublethal responses during exposure to the contaminants. Therefore, the results demonstrate that the response of microorganisms of agricultural interest to arsenic and chromium depends on the chemical form of the contaminant and the biological characteristics of each organism. These findings highlight the importance of considering both growth and cell viability when assessing microbial tolerance under contamination conditions.

Keywords: arsenic; chromium; toxicity; microorganisms; bioinoculants; microbial growth.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos meios de cultura utilizados para o cultivo dos microrganismos.....	21
Tabela 2 – Concentrações das soluções padrão dos metais utilizadas para cada microrganismo no teste de toxicidade.....	23
Tabela 3 – Tempo de incubação de cada microrganismo para cada leitura de OD.....	24
Tabela 4 – Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> exposta ao arsenato pelo modelo LL.4.	27
Tabela 5 – Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta dos microrganismos <i>A. brasilense</i> Abv06 e <i>B. japonicum</i> SEMIA 5079 expostos ao arsenito pelo modelo LL.4	30
Tabela 6 – Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta dos microrganismos <i>B. aryabhattai</i> CMAA 1363 e <i>S. cerevisiae</i> expostos ao arsenito pelo modelo LL.4.	31
Tabela 7 – Valores de tolerância, toxicidade e mortalidade sob exposição ao arsênio para <i>Azospirillum brasilense</i> e <i>Bradyrhizobium japonicum</i>	31
Tabela 8 – Valores de tolerância, toxicidade e mortalidade sob exposição ao arsênio para <i>Bacillus aryabhattai</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	31
Tabela 9 – Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta dos microrganismos expostos ao cromo pelo modelo LL.4.	33
Tabela 10 – Efeito de doses de arsenito sobre as unidades formadoras de colônia (UFC) e o percentual de mortalidade dos isolados microbianos, em diferentes períodos de incubação, determinados por contagem em placa após exposição ao metal.....	35
Tabela 11 – Efeito de doses de cromo sobre as unidades formadoras de colônias (UFC) e o percentual de mortalidade dos isolados microbianos, em diferentes períodos de incubação, determinados por contagem em placa após exposição ao contaminante.....	37

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Efeito do arsenato sobre a densidade óptica (OD₆₀₀ nm) de diferentes microrganismos em distintos tempos de incubação. (A) *Azospirillum brasilense* Abv06, (24h); (B) *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (72h); (C) *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (12h); e (D) *Saccharomyces cerevisiae* (24h). As barras representam a média das repetições..... 26
- Figura 2 – Curvas dose–resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4) para *Saccharomyces cerevisiae* (A–B) expostos a diferentes doses de arsenato em 12 e 24h. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação. Os pontos representam os valores médios experimentais e as linhas o ajuste do modelo.....26
- Figura 3 – Efeito do arsenito sobre a densidade óptica (OD₆₀₀ nm) de diferentes microrganismos em distintos tempos de incubação. (A) *Azospirillum brasilense* Abv06 (24 e 48 h); (B) *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (72 e 144 h); (C) *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (12 e 24 h); e (D) *Saccharomyces cerevisiae* (24 e 48 h). As barras representam a média das repetições.....28
- Figura 4 – Curvas dose–resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4) para *Azospirillum brasilense* Abv06 (A–B), *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (C–D), expostos a diferentes doses de arsenito. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação. Os pontos representam os valores médios experimentais e as linhas o ajuste do modelo.....29
- Figura 5 – Curvas dose–resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (A–B) e *Saccharomyces cerevisiae* (C–D) expostos a diferentes doses de arsenito. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação. Os pontos representam os valores médios experimentais e as linhas o ajuste do modelo.....30
- Figura 6 – Curvas dose–resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4) para *Azospirillum brasilense* Abv06 (A), *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (B), *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (C) e *Saccharomyces cerevisiae* (D) expostos a diferentes doses de cromo. O

crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD ₆₀₀) em diferentes tempos de incubação. Os pontos representam os valores médios experimentais e as linhas o ajuste do modelo.....	33
Figura 7 – Dissolução, especiação e biodisponibilidade do arsenato (As ⁵⁺) em meio de cultivo (pH 6,5), transporte através da membrana celular e potenciais mecanismos de toxicidade em microrganismos.....	38
Figura 8 – Esquema da especiação química do As ³⁺ , preparo da solução e transporte em células microbianas. (A) Distribuição das espécies de As (III) em função do pH. (B) Etapas de preparo da solução de As(III) a partir de As ₂ O ₃ . (C) Transporte de As(III) na célula e bombeamento externo.....	40
Figura 9 – Mecanismos de tolerância não específicos em bactérias associados à especiação do arsênio no ambiente. Os mecanismos ilustrados (1–5) representam respostas fisiológicas gerais, incluindo limitação da entrada, resposta ao estresse oxidativo, sequestro intracelular, formação de biofilme e ajustes metabólicos. Figura gerada com auxílio de inteligência artificial.....	42
Figura 10 – Mecanismos genéticos de resistência ao arsênio trivalente (As ³⁺) em bactérias, envolvendo (1) detecção e regulação gênica, (2) efluxo ativo, (3) transformação química, (4) sequestro intracelular e (5) modificação da permeabilidade celular.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1	Bioinoculantes e suas funções ecológicas	3
2.2	Interações entre microrganismos e metais	6
2.3	Metais no ambiente: fontes, comportamento e riscos ambientais e à saúde humana	8
2.4	Arsênio no ambiente: características químicas e toxicológicas	10
2.5	Toxicidade do arsênio em nível celular.....	14
2.6	Cromo no ambiente: características químicas e toxicológicas	16
2.7	Exposição, metabolismo e toxicidade do arsênio e do cromo em sistemas biológicos	18
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	Local.....	20
3.2	Obtenção dos isolados de microrganismos	20
3.3	Meios de cultura e cultivo dos microrganismos	21
3.4	Padronização dos inóculos dos isolados	21
3.5	Preparo, esterilização e diluições das soluções de As e Cr	22
3.6	Ensaio de toxicidade	23
3.7	Ensaio de sobrevivência e quantificação da mortalidade	24
3.8	Análises estatísticas.....	24
4	RESULTADOS	25
4.1	Efeito da toxicidade do arsênio.....	25
4.1.1	<i>Arsenato</i>	25
4.1.2	<i>Arsenito</i>	27
4.2	Efeito da toxicidade do cromo	32
4.3	Mortalidade de microrganismos em exposição ao arsênio	34
4.4	Mortalidade de microrganismos em exposição ao cromo	35
5	DISCUSSÃO	37
5.1	Toxicidade do arsenato (As^{5+}) nos microrganismos	38
5.2	Toxicidade do arsenito (As^{3+}) nos microrganismos	39
5.3	Limites dos efeitos da concentração e exposição ao As^{3+}	41
5.4	Toxidez do cromo aos microrganismos.....	44

5.5	Mortalidade funcional de microrganismos sob exposição a altas doses de metais	45
5.6	Cenário de toxicidade do arsênio sobre bioinsumos microbianos.....	45
6	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

A poluição por metais e metaloides destaca-se como um dos principais fatores de estresse para microrganismos de interesse agrícola. Dentre os elementos tóxicos presentes no ambiente, o arsênio (As) e o cromo (Cr) destacam-se por sua ampla distribuição em solos agrícolas e forte associação com fontes antropogênicas, como atividades industriais, mineração e uso intensivo de insumos químicos. Estudos de Mushtaq *et al.* (2022) e Kumar *et al.* (2022) demonstram que esses elementos exercem efeitos adversos significativos sobre as comunidades microbianas do solo, alterando sua estrutura e funcionalidade.

Em nível celular, o As e o Cr podem induzir a geração excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), promover danos à membrana plasmática, inibir sistemas enzimáticos essenciais e comprometer o equilíbrio redox intracelular. Esses mecanismos resultam na perturbação de vias metabólicas fundamentais, na redução da atividade microbiana, na inibição do crescimento e, em concentrações elevadas, na morte celular (Sharma *et al.*, 2022). Assim, esses contaminantes podem limitar a eficiência de microrganismos utilizados como bioinsumos.

A utilização de microrganismos benéficos na agricultura tem adquirido importância diante da necessidade de desenvolver sistemas produtivos mais sustentáveis, capazes de reduzir a dependência de insumos químicos e favorecer processos biológicos relacionados ao desenvolvimento vegetal. Microrganismos utilizados como bioinsumos podem desempenhar funções associadas à promoção do crescimento das plantas, à melhoria da disponibilidade de nutrientes e ao aumento da tolerância a condições adversas. A eficiência desses organismos, contudo, depende de sua capacidade de permanecer metabolicamente ativos diante das características ambientais encontradas nos sistemas agrícolas, incluindo a presença de elementos potencialmente tóxicos no solo (Diaz-Rodriguez *et al.*, 2025).

O arsênio também representa um fator capaz de selecionar microrganismos com diferentes níveis de tolerância, aspecto particularmente relevante quando se consideram bactérias com potencial para a promoção do crescimento vegetal. A identificação de rizobactérias resistentes ao As tem demonstrado possibilidades de aplicação em sistemas agrícolas sujeitos à contaminação, inclusive pela capacidade de determinados isolados de manter características promotoras do crescimento vegetal em condições adversas. A tolerância observada entre diferentes microrganismos reforça a necessidade de avaliar experimentalmente suas respostas ao contaminante, especialmente quanto ao crescimento e à sobrevivência celular, antes de considerar sua utilização em formulações destinadas à agricultura (Etesami *et al.*, 2023).

Essa problemática torna-se particularmente relevante no desenvolvimento e na utilização de bioinsumos, pois a presença de As e Cr no ambiente pode comprometer o crescimento e a viabilidade dos microrganismos empregados e, conseqüentemente, limitar seu desempenho após a aplicação. Diante desse cenário, formula-se a seguinte questão de pesquisa: qual é o efeito de diferentes concentrações de arsênio e cromo sobre o crescimento e a tolerância de microrganismos utilizados como bioinsumos na agricultura? Essa questão direciona a investigação para a resposta dos microrganismos à exposição aos contaminantes, permitindo verificar diferenças de sensibilidade ou tolerância e identificar concentrações capazes de comprometer seu desenvolvimento.

A realização deste estudo justifica-se pela necessidade de ampliar o conhecimento sobre a interação entre contaminantes inorgânicos e microrganismos de interesse agrícola, principalmente diante da expansão do uso de inoculantes microbianos em estratégias de produção sustentável. Embora Mushtaq *et al.* (2022) e Kumar *et al.* (2022) demonstrem o potencial de bactérias resistentes ao arsênio e ao cromo para favorecer o desenvolvimento vegetal e contribuir para a mitigação dos efeitos desses contaminantes, a resposta de cada microrganismo à exposição deve ser avaliada considerando-se a forma química do contaminante, sua concentração e o tempo de exposição.

A relevância da pesquisa também reside na possibilidade de gerar informações que possam subsidiar a seleção de microrganismos mais tolerantes para utilização como bioinsumos em ambientes sujeitos à presença de As e Cr. Al-Huqail *et al.* (2025) demonstraram resultados promissores com rizobactérias resistentes a esses contaminantes, incluindo efeitos relacionados à promoção do crescimento vegetal, à redução do estresse e à melhoria das respostas fisiológicas das plantas. A caracterização da tolerância microbiana pode, portanto, contribuir para o desenvolvimento de estratégias que conciliem produção agrícola, sustentabilidade e manejo de áreas contaminadas.

O estudo tem como objetivo geral avaliar a toxicidade de duas formas químicas de arsênio e do cromo em microrganismos utilizados como bioinsumos na agricultura, verificando os efeitos de diferentes concentrações e tempos de exposição desses elementos sobre o crescimento e a tolerância microbiana. Para alcançar esse objetivo, estabelecem-se como objetivos específicos: avaliar o crescimento dos microrganismos utilizados como bioinsumos quando expostos a diferentes concentrações de arsênio e cromo; determinar a resposta de tolerância dos microrganismos aos contaminantes avaliados; comparar os efeitos do As e do Cr sobre o desenvolvimento microbiano; identificar concentrações capazes de promover inibição significativa do crescimento dos microrganismos; e analisar o potencial de sobrevivência e manutenção do crescimento microbiano em condições de exposição aos elementos estudados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Bioinoculantes e suas funções ecológicas

Os bioinoculantes microbianos representam uma estratégia biológica associada à construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, fundamentada na utilização de microrganismos capazes de estabelecer relações benéficas com as plantas e atuar em processos essenciais ao funcionamento do ambiente agrícola. Sua importância está relacionada à possibilidade de explorar funções naturalmente desempenhadas pelas comunidades microbianas, favorecendo o desenvolvimento vegetal e reduzindo a dependência de determinadas intervenções químicas. Contudo, o desempenho desses microrganismos está condicionado não apenas às características dos organismos empregados e das plantas hospedeiras, mas também às condições ambientais nas quais ocorre a inoculação (Diaz-Rodriguez *et al.*, 2025).

Entre os grupos microbianos de interesse para a formulação de bioinoculantes, as rizobactérias promotoras do crescimento vegetal apresentam relevância pela associação estabelecida com a região rizosférica e pela capacidade de contribuir para o desenvolvimento das plantas. O potencial de utilização agrícola dessas bactérias não se restringe à promoção do crescimento em condições favoráveis, pois determinadas linhagens apresentam características que permitem sua atuação diante de fatores ambientais limitantes, incluindo a presença de contaminantes inorgânicos. Essa propriedade amplia as possibilidades de aplicação dos inoculantes microbianos em sistemas produtivos sujeitos a diferentes condições de estresse (Mushtaq *et al.*, 2022).

A funcionalidade ecológica das rizobactérias torna-se particularmente relevante quando os microrganismos apresentam, simultaneamente, tolerância a contaminantes e características promotoras do crescimento vegetal. Segundo Etesami, Jeong e Raheb (2023, p. 17):

As bactérias resistentes ao arsênio podem reunir múltiplos atributos de promoção do crescimento, condição que favorece sua utilização em ambientes onde a presença do metalóide representa uma limitação ao desenvolvimento das culturas, principalmente porque a associação entre resistência microbiana e características benéficas à planta permite considerar esses organismos como componentes potenciais de estratégias biológicas destinadas à redução dos efeitos decorrentes da exposição ao As.

No contexto da contaminação por arsênio, a seleção de bactérias do solo tolerantes ao elemento constitui uma etapa importante para reconhecer microrganismos capazes de sobreviver e manter seu crescimento diante da exposição ao contaminante. A tolerância microbiana assume, portanto, importância funcional e ecológica, uma vez que organismos capazes de sobreviver em ambientes contendo As podem apresentar potencial para o estabelecimento na rizosfera e a manutenção de atividades biologicamente relevantes, reforçando a necessidade de avaliar conjuntamente a resistência ao contaminante e a capacidade de promoção do desenvolvimento das plantas (Alves, 2024).

Quanto às áreas submetidas à presença de cromo, as rizobactérias resistentes também apresentam potencial de aplicação como agentes biológicos capazes de participar de estratégias voltadas à redução dos impactos da contaminação. A interação de PGPR resistentes ao Cr com outros componentes do ambiente pode favorecer processos relacionados à estabilização do metal na rizosfera, demonstrando que a função dos microrganismos inoculados ultrapassa a interação direta com a planta e envolve modificações relevantes na dinâmica do contaminante no sistema solo-rizosfera. Esse aspecto amplia a compreensão sobre suas funções ecológicas em ambientes agrícolas impactados (Sarwar *et al.*, 2023).

A dimensão funcional dos bioinoculantes envolve sua contribuição para as respostas das plantas ao estresse oxidativo provocado por contaminantes. Rizobactérias promotoras do crescimento vegetal selecionadas podem participar da modulação de respostas relacionadas ao metabolismo das espécies reativas de oxigênio em plantas expostas ao cromo, indicando uma associação entre a inoculação microbiana e os mecanismos biológicos envolvidos no enfrentamento do estresse. A capacidade de interferir nessas respostas demonstra que a atuação dos microrganismos benéficos pode envolver processos fisiológicos complexos, relevantes para a manutenção do desenvolvimento vegetal quando as condições ambientais são desfavoráveis (Sharma *et al.*, 2022).

A bioinoculação também pode influenciar componentes relacionados à fisiologia vegetal, à homeostase iônica e às defesas antioxidantes em condições de estresse combinado, evidenciando que a contribuição das rizobactérias não está limitada a um único mecanismo de promoção do crescimento. A atuação de PGPR diante da exposição ao cromo e ao estresse salino demonstra a amplitude funcional desses organismos, sobretudo quando sua presença está associada à melhoria das respostas fisiológicas das plantas, ao equilíbrio de íons e ao fortalecimento de sistemas antioxidantes. Essas características são relevantes para a compreensão do papel ecológico dos inoculantes em ambientes submetidos a múltiplas pressões (Sobahan *et al.*, 2025).

Em relação à rizosfera, a utilização de PGPR em solos contaminados por cromo pode repercutir tanto sobre o crescimento vegetal quanto sobre os componentes da biomassa microbiana, demonstrando a existência de interações que envolvem plantas, microrganismos e contaminantes. A resposta observada nesse compartimento é particularmente importante para a avaliação de bioinoculantes, pois a manutenção da atividade microbiana representa um componente fundamental da funcionalidade biológica do solo, enquanto o desempenho vegetal fornece evidências sobre a capacidade dos microrganismos introduzidos de exercer efeitos benéficos mesmo diante da presença do metal (Silva *et al.*, 2021).

Em relação ao arsênio, rizobactérias resistentes com características promotoras do crescimento também apresentam importância por seu potencial de contribuir para estratégias destinadas à redução da presença ou dos efeitos do contaminante nas culturas. A utilização desses microrganismos aproxima duas funções de interesse agrícola e ambiental: a promoção do desenvolvimento vegetal e a participação em processos relacionados à mitigação do As. Isso indica que a seleção de bioinoculantes para áreas contaminadas deve considerar não apenas sua capacidade de sobrevivência, mas também a preservação de características funcionais capazes de favorecer o sistema vegetal durante a exposição ao metaloide (Kumar *et al.*, 2022).

A diversidade funcional existente entre rizobactérias tolerantes reforça a importância da seleção de microrganismos adaptados às condições ambientais nas quais se pretende utilizá-los. Isolados tolerantes ao arsênio podem apresentar potencial para reduzir a translocação do contaminante e favorecer o crescimento vegetal, demonstrando que a resistência microbiana pode estar associada a respostas de interesse para sistemas agrícolas estabelecidos em ambientes impactados (Akoijam; Joshi, 2026).

A compreensão das funções ecológicas dos bioinoculantes evidencia, portanto, que sua eficiência depende da integração entre características promotoras do crescimento, capacidade de estabelecimento no ambiente e tolerância aos fatores de estresse presentes no sistema agrícola. Em solos contaminados por metais, associações entre microrganismos e outros componentes podem ampliar as respostas vegetais, como observado na utilização combinada de biochar e rizobactérias promotoras do crescimento sob estresse por cromo. Esse aspecto reforça que a funcionalidade dos inoculantes deve ser analisada considerando-se as interações estabelecidas no sistema solo-planta-microrganismo e as condições ambientais que determinam seu desempenho (Jalal *et al.*, 2025).

2.2 Interações entre microrganismos e metais

A interação entre microrganismos e metais ou metaloides presentes no solo constitui uma relação relevante para a compreensão da dinâmica de ambientes agrícolas contaminados, principalmente porque determinados grupos microbianos podem permanecer viáveis ou manter seu crescimento mesmo diante da exposição a elementos potencialmente tóxicos. No caso do cromo, estudos com rizobactérias promotoras do crescimento vegetal resistentes ao metal demonstram o potencial desses microrganismos para atuar em ambientes contaminados, associando tolerância microbiana e manutenção de funções benéficas às plantas, condição importante para aplicações agrícolas e estratégias biológicas de mitigação da contaminação (Mushtaq *et al.*, 2022).

No contato com o cromo, a resposta biológica envolve alterações relacionadas ao estresse oxidativo, processo que pode interferir no equilíbrio entre a formação e o controle de espécies reativas de oxigênio. A participação de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal na modulação de respostas relacionadas ao metabolismo dessas espécies demonstra que a interação com o metal não se limita à sobrevivência microbiana, mas envolve mecanismos associados à capacidade do sistema biológico de responder aos efeitos provocados pela exposição ao contaminante (Sharma *et al.*, 2022).

Quanto ao arsênio, a interação com microrganismos do solo pode selecionar organismos capazes de tolerar sua presença e, no caso de determinadas bactérias de interesse agrícola, conservar características relacionadas à promoção do crescimento vegetal. Microrganismos resistentes ao As que apresentam múltiplos atributos promotores do crescimento possuem particular interesse em sistemas agrícolas contaminados, pois sua adaptação ao metaloide pode estar associada à redução da toxicidade e do acúmulo de arsênio nas plantas. Esse aspecto evidencia a importância funcional da resistência microbiana para aplicações em ambientes sujeitos à contaminação (Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

Em continuidade, Alves (2024, p. 21) afirma:

As bactérias do solo tolerantes ao arsênio podem apresentar potencial para promoção do crescimento vegetal, característica que demonstra a importância de avaliar conjuntamente a resistência ao contaminante e a conservação das propriedades funcionais dos microrganismos. A seleção de organismos tolerantes permite reconhecer grupos microbianos capazes de persistir diante da pressão exercida pelo As, constituindo uma etapa relevante para compreender como a presença do metaloide influencia a sobrevivência e o potencial de utilização de bactérias associadas aos sistemas agrícolas.

Na rizosfera contaminada por cromo, as relações entre microrganismos, metal e componentes do solo podem interferir na mobilidade e na estabilização do contaminante. Entre os microrganismos estudados nesse contexto, rizobactérias resistentes são utilizadas em associação com outros materiais. A interação entre PGPR resistentes ao Cr e composto orgânico tem sido investigada como alternativa para favorecer a fitoestabilização do metal, demonstrando que a atividade microbiana pode integrar estratégias destinadas ao manejo de ambientes contaminados e contribuir para modificar as relações estabelecidas entre contaminante, solo e planta (Sarwar *et al.*, 2023).

A interação entre microrganismos e cromo também pode ser observada nas respostas da comunidade microbiana presente no solo, cuja biomassa representa um componente relevante para a avaliação dos efeitos da contaminação sobre os organismos presentes no ambiente. A utilização de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal em solo contaminado por Cr pode repercutir simultaneamente sobre o desenvolvimento da planta e a biomassa microbiana, demonstrando que a presença do metal estabelece relações que abrangem diferentes componentes biológicos do sistema solo-planta-microrganismo (Silva *et al.*, 2021).

Em ambientes contendo arsênio, a resistência apresentada por determinados microrganismos amplia as possibilidades de sua permanência em condições de contaminação. Entre os grupos estudados para aplicações agrícolas, PGPR resistentes ao As têm sido investigadas por sua capacidade de contribuir para o abatimento do arsênio em cultivos, relacionando a adaptação microbiana ao contaminante à aplicação biológica. Essa relação reforça a importância de caracterizar a tolerância dos microrganismos antes de sua utilização em ambientes nos quais as concentrações do metaloide possam limitar sua sobrevivência ou funcionalidade (Kumar *et al.*, 2022).

Considerando a complexidade dessas interações, a tolerância microbiana representa uma característica determinante para a permanência de microrganismos benéficos em ambientes contaminados. No caso daqueles utilizados como bioinsumos, essa característica é particularmente importante, uma vez que a exposição aos contaminantes pode comprometer seu crescimento e sua viabilidade. Conforme Akoijam e Joshi (2026), rizobactérias tolerantes ao arsênio podem contribuir para reduzir a translocação do contaminante e favorecer o crescimento vegetal, indicando que a avaliação da resposta dos microrganismos à exposição a metais e metaloides constitui uma base importante para a seleção de organismos destinados à aplicação como bioinsumos.

2.3 Elementos potencialmente tóxicos no ambiente: fontes, comportamento e riscos ambientais e à saúde humana

A presença de elementos potencialmente tóxicos no ambiente constitui uma preocupação relacionada à qualidade dos solos, da água e dos sistemas produtivos, principalmente quando esses elementos atingem concentrações capazes de provocar alterações nos componentes biológicos. Entre os contaminantes abordados no contexto agrícola, o arsênio apresenta importância devido à possibilidade de ocorrência e dispersão em diferentes compartimentos ambientais, condição que exige atenção quanto à caracterização das áreas afetadas e às estratégias destinadas à recuperação de solos contaminados (Rener *et al.*, 2022).

No ambiente, a ocorrência do arsênio está relacionada a processos que determinam sua presença e distribuição em diferentes matrizes, tornando sua caracterização indispensável para a avaliação de situações de contaminação. A permanência do elemento em solos contaminados amplia a preocupação ambiental, sobretudo porque sua presença pode interferir na qualidade desses ambientes e demandar estratégias de biorremediação, nas quais processos biológicos são considerados alternativas para o manejo de áreas impactadas pelo metaloide (Rener *et al.*, 2022).

Quanto aos recursos hídricos, Ramos (2019, p. 28) relata:

A contaminação por arsênio também representa uma questão relevante devido à possibilidade de dispersão do elemento a partir de fontes subterrâneas contaminadas. A avaliação de poços no norte do estado do Rio de Janeiro evidencia a importância de investigar espacialmente a presença do As, considerando que sua dispersão pode ampliar a área submetida à contaminação e comprometer recursos utilizados pelas populações, reforçando a necessidade de monitoramento das fontes de exposição ambiental.

No contexto dos solos agrícolas, o comportamento dos contaminantes deve ser compreendido em associação com os componentes biológicos presentes no solo e na rizosfera, uma vez que a interação entre metais e metaloides, microrganismos e plantas influencia as respostas observadas no ambiente. Para o cromo, diferentes microrganismos podem apresentar níveis distintos de tolerância ao contaminante. Entre os grupos estudados nesse contexto, as rizobactérias promotoras do crescimento vegetal apresentam potencial para participar de estratégias voltadas à mitigação da contaminação, indicando que a dinâmica ambiental do metal pode ser analisada conjuntamente com processos biológicos capazes de reduzir seus impactos nos sistemas produtivos (Mushtaq *et al.*, 2022).

A contaminação por cromo pode provocar alterações que ultrapassam a presença física do elemento no solo, alcançando processos fisiológicos e bioquímicos dos organismos expostos. Entre as respostas associadas à toxicidade do Cr, o estresse oxidativo ocupa posição relevante, pois envolve alterações no metabolismo de espécies reativas de oxigênio, capazes de afetar o equilíbrio biológico dos organismos. Estudos com rizobactérias promotoras do crescimento vegetal indicam que esses microrganismos podem contribuir para modular respostas relacionadas ao enfrentamento dessa condição de estresse (Sharma *et al.*, 2022).

Na rizosfera, o comportamento do cromo pode ser influenciado pelas interações estabelecidas entre o contaminante, os microrganismos e os componentes incorporados ao solo. Entre os microrganismos investigados para essa finalidade, a utilização conjunta de rizobactérias resistentes ao Cr e composto orgânico tem sido associada à fitoestabilização do metal, processo de interesse ambiental por favorecer sua retenção no sistema rizosférico. Esse aspecto demonstra que intervenções biológicas podem participar do manejo da contaminação e contribuir para limitar os impactos decorrentes da presença do elemento em ambientes agrícolas (Sarwar *et al.*, 2023).

Em plantas cultivadas sob exposição ao cromo, os riscos ambientais também podem ser compreendidos a partir das alterações fisiológicas desencadeadas pelo contaminante, especialmente quando a toxicidade interfere nas respostas antioxidantes e na relação entre a planta e o microbioma da rizosfera. Nesse contexto, estudos com microrganismos de interesse agrícola, especialmente PGPR em arroz submetido ao Cr, têm investigado componentes do estresse oxidativo e mecanismos antioxidantes, indicando que a contaminação estabelece efeitos integrados entre o elemento químico, o sistema vegetal e a comunidade microbiana associada às raízes (Al-Huqail *et al.*, 2025).

O comportamento ambiental do cromo também envolve sua interferência nos componentes microbiológicos do solo, cuja conservação é importante para o funcionamento dos sistemas agrícolas. Em solo contaminado, a avaliação conjunta do crescimento do milho e da biomassa microbiana permite reconhecer que os efeitos do metal alcançam diferentes níveis do sistema solo-plantas. Além disso, estudos com rizobactérias promotoras do crescimento vegetal demonstram a importância da tolerância microbiana diante da exposição ao contaminante e possibilitam a investigação de respostas relacionadas à manutenção da atividade microbiana e do desenvolvimento vegetal (Silva *et al.*, 2021).

Em relação ao arsênio, os riscos associados à sua presença em ambientes agrícolas incluem a possibilidade de incorporação do metaloide aos sistemas de cultivo, tornando importante a compreensão de estratégias capazes de reduzir seu impacto sobre as culturas. Entre os microrganismos estudados em ambientes contaminados, rizobactérias resistentes ao As

apresentam interesse por reunirem características promotoras do crescimento vegetal e potencial para contribuir para a redução da toxicidade e do acúmulo de arsênio em arroz. Dessa forma, o comportamento do contaminante também está relacionado às interações estabelecidas entre microrganismos, plantas e ambiente (Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

Do ponto de vista da transferência do contaminante no sistema agrícola, a translocação do arsênio representa um aspecto importante para a compreensão dos riscos decorrentes de sua presença no ambiente de cultivo. Rizobactérias tolerantes ao As provenientes de ambientes contaminados têm sido avaliadas quanto à capacidade de reduzir a translocação do metaloide e favorecer o crescimento do arroz, indicando que a interação com microrganismos específicos pode modificar respostas relacionadas à passagem do contaminante pelo sistema vegetal e contribuir para estratégias de mitigação em áreas afetadas (Akoijam; Joshi, 2026).

A relação entre contaminação ambiental e exposição biológica torna necessária a adoção de estratégias capazes de reduzir a disponibilidade ou os efeitos dos elementos potencialmente tóxicos nos sistemas agrícolas. No caso do arsênio, diferentes microrganismos tolerantes têm sido investigados quanto ao seu potencial de aplicação em ambientes contaminados. Entre eles, o emprego de rizobactérias resistentes e promotoras do crescimento vegetal apresenta potencial para integrar abordagens voltadas ao abatimento do contaminante em culturas, associando resistência microbiana e aplicação agrícola. Essa perspectiva mostra-se relevante diante da necessidade de limitar a transferência do As no sistema solo-planta e seus potenciais impactos ambientais (Kumar *et al.*, 2022).

Diante da persistência dos problemas relacionados ao arsênio e ao cromo nos sistemas ambientais e agrícolas, compreender suas formas de ocorrência, dispersão, interação com organismos e transferência no sistema solo-planta torna-se fundamental para dimensionar os riscos associados à contaminação. Para Latif, Batool e Mafi (2026), a utilização de microrganismos resistentes constitui uma perspectiva relevante para enfrentar parte desses impactos. Entretanto, sua aplicação exige conhecimento sobre a tolerância aos contaminantes e a conservação de características funcionais, fatores indispensáveis para a seleção de organismos com potencial de utilização em ambientes submetidos à toxicidade por metais.

2.4 Arsênio no ambiente: características químicas e toxicológicas

O As é um metaloide de relevância ambiental em razão de suas características químicas, de sua ocorrência em diferentes compartimentos e de seu potencial de contaminação de solos, águas e sistemas biológicos. Sua presença ambiental requer atenção quanto às formas de dispersão e aos efeitos decorrentes da exposição, principalmente em áreas onde concentrações

elevadas podem comprometer a qualidade ambiental. A caracterização química do elemento representa uma etapa necessária para compreender seu comportamento em ambientes contaminados e fundamentar estratégias voltadas à recuperação de solos afetados. O arsênio pode ocorrer em diferentes estados de oxidação, sendo as formas inorgânicas arsenito, As(III), e arsenato, As(V), particularmente relevantes em sistemas ambientais (Rener *et al.*, 2022).

A ocorrência do arsênio no ambiente envolve processos naturais e interferências relacionadas às atividades humanas, fatores que podem contribuir para sua presença em diferentes matrizes ambientais. Em seu estudo, Rener *et al.*, (2022, p. 11) afirma que:

A contaminação de solos assume particular importância devido à permanência do elemento no ambiente e à possibilidade de interação com organismos presentes nesses sistemas, tornando necessária a avaliação das características das áreas afetadas. O conhecimento sobre o As e seu comportamento ambiental fornece fundamentos para reconhecer situações de contaminação e avaliar alternativas biológicas destinadas ao manejo de solos impactados.

A presença do arsênio em águas subterrâneas representa uma importante via de dispersão ambiental, principalmente quando poços contaminados estão distribuídos em áreas utilizadas para abastecimento ou outras atividades humanas. A avaliação da dispersão do As permite compreender espacialmente a extensão da contaminação e identificar áreas sujeitas à presença do elemento, aspecto relevante para dimensionar os problemas ambientais relacionados às fontes subterrâneas e reconhecer a necessidade de acompanhamento das concentrações encontradas nesses sistemas hídricos (Ramos, 2019).

No solo, a presença do arsênio estabelece condições capazes de exercer pressão sobre os organismos que compõem a comunidade microbiana, selecionando grupos com diferentes níveis de tolerância ao contaminante. Bactérias isoladas de ambientes contendo As podem apresentar capacidade de crescimento diante da exposição ao elemento, característica de interesse para a compreensão das respostas microbianas desenvolvidas em condições adversas. A tolerância observada entre bactérias do solo também pode estar associada à conservação de propriedades relacionadas à promoção do crescimento vegetal, ampliando seu potencial de utilização agrícola (Alves, 2024).

A presença do arsênio em ambientes agrícolas torna-se relevante porque sua interação com os organismos pode produzir efeitos capazes de comprometer processos biológicos e limitar o desenvolvimento vegetal. A toxicidade constitui uma das principais questões associadas ao metaloide, especialmente quando ocorre sua incorporação aos sistemas de cultivo. Bactérias resistentes ao As têm sido investigadas justamente pela possibilidade de manter múltiplas características promotoras do crescimento vegetal e contribuir para atenuar os

efeitos tóxicos decorrentes da exposição das plantas ao contaminante (Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

Em sistemas agrícolas contaminados, outro aspecto importante corresponde à possibilidade de acúmulo de arsênio nas plantas, processo que amplia a relevância ambiental do elemento ao estabelecer uma relação entre sua presença no ambiente e sua incorporação pelos organismos vegetais. O estudo de Etesami, Jeong e Raheb (2023, p. 14) realizados com arroz demonstram que:

Interesse no emprego de bactérias resistentes ao As como estratégia para reduzir tanto a toxicidade quanto o acúmulo do metaloide, indicando que as interações biológicas presentes na rizosfera podem desempenhar papel importante na resposta das culturas estabelecidas em ambientes contaminados.

No âmbito da rizosfera, as características do arsênio também devem ser consideradas em função das relações estabelecidas com microrganismos associados às raízes, sobretudo aqueles capazes de sobreviver à presença do contaminante. As rizobactérias resistentes ao As podem reunir propriedades de interesse agrícola, incluindo características promotoras do crescimento vegetal, condição que permite relacionar resistência microbiana e potencial de aplicação em estratégias destinadas à redução dos efeitos da contaminação. A identificação dessas bactérias representa uma abordagem relevante para ambientes agrícolas submetidos à pressão exercida pelo metaloide (Kumar *et al.*, 2022).

Um componente relevante da toxicologia ambiental do arsênio corresponde à sua translocação nos vegetais, processo importante para compreender a movimentação do contaminante após sua interação com o sistema radicular. A avaliação de rizobactérias tolerantes ao As em arroz demonstra interesse na redução da translocação do metaloide, simultaneamente considera a manutenção do crescimento vegetal, indicando que determinadas interações microbianas podem contribuir para modificar as respostas das plantas diante da presença do contaminante no ambiente de cultivo (Akoijam; Joshi, 2026).

Em relação ao manejo ambiental, a persistência do arsênio em solos contaminados estimula a investigação de alternativas capazes de reduzir seus impactos por meio de processos biológicos. A biorremediação representa uma perspectiva associada ao aproveitamento de organismos e mecanismos biológicos para atuação em áreas afetadas, sendo a caracterização do contaminante fundamental para compreender as condições nas quais essas estratégias podem ser aplicadas. A relação entre propriedades do As, a contaminação do solo e as possibilidades de remediação demonstra a necessidade de integrar conhecimentos químicos e biológicos na avaliação ambiental (Renner *et al.*, 2022).

No campo agrícola, a utilização de microrganismos resistentes ao arsênio adquire importância quando a contaminação compromete simultaneamente a qualidade do ambiente e o desenvolvimento das culturas, exigindo estratégias que considerem ambos os componentes. As rizobactérias promotoras do crescimento vegetal resistentes ao As têm sido estudadas como recursos biológicos para o abatimento do contaminante em culturas, perspectiva que associa capacidade de tolerância, interação com plantas e redução dos efeitos relacionados à presença do metaloide, fortalecendo o interesse por abordagens microbiológicas aplicadas ao manejo de áreas agrícolas contaminadas (Kumar *et al.*, 2022).

A exposição ambiental ao arsênio também requer atenção quanto à proximidade entre fontes contaminadas e populações que utilizam recursos ambientais sujeitos à presença do elemento, especialmente quando a contaminação alcança águas subterrâneas. A dispersão identificada em poços demonstra que o problema pode ultrapassar o ponto inicial de ocorrência, tornando importante conhecer a distribuição espacial do contaminante e avaliar áreas potencialmente afetadas. A investigação dessas fontes constitui parte necessária da caracterização ambiental do As e fornece subsídios para dimensionar situações de exposição relacionadas aos recursos hídricos contaminados (Ramos, 2019).

Considerando a aplicação de bioinsumos em ambientes contendo arsênio, a toxicidade do metaloide representa uma condição seletiva que pode interferir na sobrevivência e no desempenho dos microrganismos introduzidos. A identificação de bactérias do solo tolerantes ao As e dotadas de potencial de promoção do crescimento vegetal evidencia que a resistência precisa ser considerada na seleção de organismos destinados à aplicação agrícola, principalmente porque a permanência do microrganismo diante da exposição constitui requisito para que suas propriedades funcionais possam ser expressas em ambientes submetidos à contaminação (Alves, 2024).

Considerando as características ambientais e toxicológicas do arsênio, sua presença em solos e águas, a possibilidade de incorporação aos sistemas agrícolas e os efeitos associados à exposição justificam a avaliação integrada do contaminante e dos organismos presentes no ambiente. A seleção de bactérias resistentes com múltiplas características promotoras do crescimento representa uma perspectiva relevante para reduzir impactos sobre culturas, porém sua utilização depende da compreensão da tolerância microbiana ao As, aspecto diretamente relacionado à avaliação experimental da toxicidade em microrganismos destinados à utilização como bioinsumos agrícolas (Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

2.5 Toxicidade do arsênio em nível celular

A toxicidade do arsênio está relacionada às propriedades do elemento e às respostas desencadeadas nos organismos expostos, tornando sua presença em ambientes contaminados um aspecto relevante para a manutenção da atividade biológica. Em sistemas microbianos, a exposição estabelece condições seletivas que podem comprometer organismos sensíveis e favorecer a permanência daqueles capazes de tolerar o contaminante, característica particularmente importante em solos agrícolas, nos quais a atividade dos microrganismos integra processos ecológicos e pode ser aproveitada em estratégias de biorremediação de áreas afetadas pelo As (Rener *et al.*, 2022).

A resposta celular ao arsênio pode variar entre os microrganismos, sendo a manutenção do crescimento na presença do contaminante um indicador importante para reconhecer organismos tolerantes. A avaliação de bactérias provenientes do solo permite identificar isolados capazes de suportar condições de exposição ao As e conservar características relacionadas à promoção do crescimento vegetal, demonstrando que a toxicidade não produz respostas uniformes entre diferentes organismos. Nesse contexto, a seleção de bactérias tolerantes constitui uma etapa necessária para reconhecer microrganismos potencialmente aplicáveis em ambientes agrícolas contaminados (Alves, 2024).

Entre bactérias resistentes ao arsênio, a tolerância ao contaminante pode coexistir com diferentes características promotoras do crescimento vegetal, condição relevante porque a exposição ao metaloide exige que o organismo mantenha sua funcionalidade mesmo diante da pressão química. A conservação dessas propriedades demonstra que determinadas bactérias apresentam respostas compatíveis com sua sobrevivência em ambientes contendo As, possibilitando a investigação de sua utilização na redução dos efeitos da toxicidade e do acúmulo do contaminante nas plantas, especialmente em sistemas agrícolas nos quais a presença do metaloide constitui fator limitante (Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

A resistência ao arsênio representa uma propriedade fundamental para microrganismos destinados à utilização em ambientes contaminados, pois a exposição pode estabelecer condições incompatíveis com a manutenção de organismos mais sensíveis. Rizobactérias resistentes ao As apresentam interesse pela associação entre capacidade de tolerância e funções promotoras do crescimento vegetal, permitindo explorar organismos adaptados à presença do contaminante em estratégias voltadas à sua redução em culturas agrícolas. Além disso, a caracterização dessa resistência fornece informações relevantes para compreender a resposta microbiana diante de diferentes condições de exposição (Kumar *et al.*, 2022).

Quanto à intensidade da exposição, a resposta dos microrganismos pode ser investigada mediante concentrações crescentes de arsênio, permitindo verificar alterações no crescimento e reconhecer diferenças de tolerância entre os organismos avaliados. Rizobactérias tolerantes ao As apresentam particular interesse quando conseguem conservar propriedades relacionadas ao desenvolvimento vegetal, visto que a manutenção da funcionalidade na presença do metaloide constitui requisito para sua utilização em condições contaminadas, enquanto a avaliação experimental da tolerância contribui para selecionar isolados com maior potencial de aplicação agrícola (Akoijam; Joshi, 2026).

A resposta dos microrganismos à exposição ao As poderá ser expressa pelo percentual de inibição do crescimento (mortalidade) em relação ao tratamento controle, conforme a Equação 1. permite reconhecer isolados que suportem a pressão exercida pelo contaminante sem perder propriedades relevantes para a interação com as plantas e permanência no ambiente agrícola.

$$\text{Inibição do crescimento (\%)} = \frac{C - T}{C} \times 100$$

Em que:

I (%) = percentual de inibição do crescimento;

C = medida de crescimento obtida no tratamento controle, sem As;

T = medida de crescimento obtida no tratamento contendo As.

No âmbito dos bioinsumos, a exposição ao arsênio exige atenção à relação entre tolerância e conservação das características funcionais dos microrganismos, pois a sobrevivência isoladamente não garante o desempenho esperado após sua aplicação agrícola. Bactérias do solo capazes de tolerar o As e apresentar potencial de promoção do crescimento vegetal constituem organismos de interesse para seleção, principalmente porque a avaliação conjunta dessas características permite reconhecer isolados que suportem a pressão exercida pelo contaminante sem perder propriedades relevantes para sua interação com as plantas e permanência no ambiente agrícola (Alves, 2024).

Diante dos efeitos associados ao arsênio, a caracterização da resposta microbiana constitui uma etapa necessária para compreender os limites de tolerância dos organismos destinados à aplicação em ambientes contaminados. A avaliação do crescimento diante da exposição permite relacionar concentração e resposta biológica, fornecendo bases para distinguir microrganismos mais sensíveis daqueles capazes de permanecer ativos em condições

adversas, enquanto o conhecimento das características do As e das possibilidades de utilização de processos biológicos em solos contaminados reforça a importância da investigação de organismos resistentes para aplicações ambientais e agrícolas (Rener *et al.*, 2022).

2.6 Cromo no ambiente: características químicas e toxicológicas

O Cr é um elemento de ocorrência natural, amplamente distribuído em poeira vulcânica, rochas e solos. Trata-se de um metal de transição do bloco d, caracterizado por elevado potencial redox e pela capacidade de existir em múltiplos estados de oxidação, variando de $-II$ a $+6$. No entanto, em condições ambientais e fisiológicas, as formas mais estáveis e relevantes são o cromo trivalente (Cr^{3+}) e o cromo hexavalente (Cr^{6+}), cuja presença em ambientes contaminados desperta interesse devido às implicações do elemento para sistemas agrícolas e biológicos (Mushtaq *et al.*, 2022).

A presença do cromo em ambientes agrícolas pode estabelecer condições de estresse capazes de comprometer o desenvolvimento vegetal e modificar as relações estabelecidas entre plantas e microrganismos da rizosfera. A utilização de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal resistentes ao Cr tem sido investigada como estratégia para mitigar os efeitos da contaminação, demonstrando que a tolerância microbiana constitui uma característica relevante em ambientes expostos ao metal, principalmente quando os organismos conseguem manter funções benéficas associadas ao crescimento das plantas (Silva *et al.*, 2021).

No âmbito toxicológico, um dos aspectos relevantes da exposição ao cromo corresponde ao estabelecimento de estresse oxidativo, condição relacionada a alterações no metabolismo das espécies reativas de oxigênio. A investigação de plantas submetidas ao Cr demonstra que a resposta ao contaminante pode envolver mecanismos antioxidantes e alterações em processos relacionados às EROs. Além disso, a utilização de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal pode participar da modulação dessas respostas, contribuindo para compreender as relações entre exposição ao metal, toxicidade e mecanismos biológicos de defesa (Sharma *et al.*, 2022).

Quanto ao ambiente rizosférico, o comportamento do cromo pode ser influenciado pelas interações estabelecidas entre plantas, microrganismos e componentes presentes no solo, tornando esse compartimento importante para estratégias de manejo da contaminação. Rizobactérias resistentes ao Cr utilizadas em associação com composto têm demonstrado potencial para participar da fitoestabilização do metal na rizosfera, evidenciando que a atividade microbiana pode contribuir para processos destinados a limitar os efeitos da contaminação e

favorecer condições mais adequadas ao desenvolvimento vegetal em solos afetados (Sarwar *et al.*, 2023).

Em plantas expostas ao cromo, a toxicidade pode estar associada a alterações nas respostas antioxidantes e na organização das interações estabelecidas no ambiente radicular, fatores que ajudam a compreender a complexidade dos efeitos produzidos pelo contaminante. Em arroz, a utilização de PGPR para a mitigação da toxicidade do Cr tem sido analisada considerando o microbioma da rizosfera, as respostas antioxidantes e aquelas relacionadas ao estresse oxidativo, demonstrando que os efeitos do metal abrangem diferentes componentes fisiológicos e microbiológicos envolvidos na resposta das plantas à exposição (Al-Huqail *et al.*, 2025).

Os efeitos do cromo podem ser observados quando sua presença está simultaneamente a outros fatores de estresse, condição que exige respostas fisiológicas capazes de manter o equilíbrio funcional da planta. A bioaugmentação com rizobactérias promotoras do crescimento vegetal em arroz submetido ao Cr e à salinidade tem sido associada à melhoria da fisiologia, da homeostase iônica e das defesas antioxidantes, demonstrando que a toxicidade do metal integra um conjunto de alterações fisiológicas cuja intensidade pode ser modulada pela interação com microrganismos benéficos (Sobahan *et al.*, 2025).

No sistema solo-planta, os efeitos decorrentes da contaminação por cromo também alcançam componentes microbiológicos importantes para a funcionalidade do ambiente agrícola. A utilização de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal em solo contaminado tem sido relacionada tanto quanto ao desenvolvimento do milho quanto à biomassa microbiana, permitindo avaliar simultaneamente respostas vegetais e microbiológicas diante da presença do contaminante. A análise integrada desses componentes contribui para compreender como o Cr interfere no funcionamento biológico do solo e como a inoculação pode modificar as respostas observadas (Silva *et al.*, 2021).

Diante da toxicidade do cromo, a seleção de microrganismos resistentes representa uma estratégia relevante para ambientes agrícolas submetidos à contaminação, principalmente quando a tolerância está associada à manutenção de características promotoras do crescimento vegetal. Rizobactérias resistentes ao Cr têm sido avaliadas em milho como alternativa para mitigar os efeitos provocados pelo metal, reforçando que a capacidade de sobrevivência e de funcionamento dos microrganismos diante da exposição constitui um parâmetro importante para selecionar organismos destinados à aplicação em sistemas produtivos afetados pela presença do contaminante (Latif; Batool; Mafi, 2026).

2.7 Exposição, metabolismo e toxicidade do arsênio e do cromo em sistemas biológicos

A exposição ao arsênio e ao cromo em sistemas biológicos envolve respostas condicionadas pela concentração dos contaminantes, pelo organismo exposto e pelas interações estabelecidas no ambiente, fatores que podem determinar diferentes níveis de tolerância e comprometimento funcional. Em ambientes contendo As, rizobactérias tolerantes apresentam interesse pela capacidade de permanecer ativas diante do metaloide. Além disso, sua associação com plantas pode contribuir para reduzir a translocação do contaminante e favorecer o crescimento vegetal, evidenciando relações entre exposição, resistência microbiana e resposta do organismo hospedeiro (Akoijam; Joshi, 2026).

A presença do cromo no sistema solo-planta pode repercutir simultaneamente sobre o desenvolvimento vegetal e sobre componentes microbiológicos responsáveis por processos importantes no ambiente edáfico. A avaliação de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal em solos contaminados permite relacionar a exposição ao Cr com alterações observadas na planta e na biomassa microbiana, demonstrando que a toxicidade do metal alcança diferentes componentes biológicos e que a interação com microrganismos representa uma variável relevante para a compreensão das respostas produzidas em condições de contaminação (Silva *et al.*, 2021).

A resistência ao arsênio representa uma característica determinante para a manutenção de microrganismos em ambientes nos quais a presença do metaloide exerce pressão sobre organismos sensíveis, principalmente quando se pretende aproveitar suas funções em sistemas agrícolas. As rizobactérias resistentes ao As podem conservar propriedades promotoras do crescimento vegetal e apresentar potencial a fim de contribuir para a redução do contaminante em culturas, demonstrando que a resposta à exposição envolve não apenas a sobrevivência, mas também a preservação de características funcionais necessárias à interação entre o microrganismo e a planta (Kumar *et al.*, 2022).

A toxicidade provocada pelo cromo pode estar relacionada a alterações no equilíbrio oxidativo dos sistemas biológicos, envolvendo respostas antioxidantes e processos associados ao metabolismo de espécies reativas de oxigênio. A utilização de PGPR em plantas expostas ao metal tem demonstrado relação com a modulação dessas respostas, indicando que os efeitos do Cr podem ser avaliados a partir das alterações desencadeadas pelo estresse oxidativo e dos mecanismos biológicos mobilizados para limitar os danos provocados pelo contaminante durante sua interação com o organismo (Sharma *et al.*, 2022).

O contato de bactérias com o arsênio estabelece uma pressão seletiva capaz de revelar diferentes níveis de tolerância entre organismos presentes no solo, aspecto relevante para

avaliar a permanência e o funcionamento microbiano em ambientes contaminados. Bactérias tolerantes ao As podem conservar potencial relacionado à promoção do crescimento vegetal, característica que amplia sua importância para sistemas agrícolas, pois a resposta ao contaminante passa a ser compreendida conjuntamente com a capacidade de manter propriedades funcionais mesmo diante das condições adversas impostas pela exposição ao metaloide (Alves, 2024).

A exposição vegetal ao cromo envolve respostas que alcançam a fisiologia da planta, o microbioma associado à rizosfera e os mecanismos antioxidantes mobilizados diante do estresse. A utilização de rizobactérias promotoras do crescimento vegetal em arroz submetido ao metal tem sido relacionada à mitigação da toxicidade, considerando alterações no microbioma rizosférico e nas respostas antioxidantes, o que evidencia a complexidade das interações biológicas estabelecidas durante a exposição e reforça a importância dos microrganismos na modulação dos efeitos produzidos pelo contaminante (Al-huqail *et al.*, 2025).

A manutenção de características promotoras do crescimento em bactérias resistentes ao arsênio demonstra que a resposta ao metaloide pode envolver adaptações compatíveis com a permanência funcional dos microrganismos em condições contaminadas. A utilização desses organismos em arroz tem sido associada à possibilidade de atenuar a toxicidade e o acúmulo de As, indicando que as interações estabelecidas na rizosfera podem repercutir sobre a resposta vegetal ao contaminante e que a tolerância microbiana representa um componente importante para estratégias biológicas aplicadas aos sistemas agrícolas expostos (Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

A ocorrência conjunta de cromo e outros fatores de estresse pode produzir respostas biológicas complexas, envolvendo alterações fisiológicas, homeostase iônica e mecanismos responsáveis pela defesa antioxidante. A utilização de PGPR em arroz submetido simultaneamente ao Cr e à salinidade tem sido associada à melhoria desses componentes, demonstrando que a interação com microrganismos benéficos pode modificar a resposta do sistema vegetal diante da exposição e contribuir para a manutenção de processos fisiológicos importantes quando diferentes pressões ambientais atuam sobre o organismo (Sobahan *et al.*, 2025).

A interação entre microrganismos resistentes e componentes incorporados ao solo também pode modificar as respostas observadas diante da contaminação por cromo, principalmente quando estratégias combinadas são utilizadas para favorecer o desenvolvimento vegetal. A associação de biochar com rizobactérias promotoras do crescimento tem sido investigada em trigo submetido ao estresse por Cr, demonstrando que a resposta à exposição

pode ser influenciada pelas condições do sistema solo-microrganismo-planta e que intervenções integradas apresentam potencial para reduzir limitações relacionadas à toxicidade do contaminante (Jalal *et al.*, 2025).

A presença do cromo na rizosfera estabelece interações que podem influenciar sua permanência e seus efeitos sobre os componentes biológicos, tornando relevantes estratégias capazes de atuar sobre a dinâmica do contaminante no solo. Rizobactérias resistentes ao Cr associadas ao composto têm sido empregadas em abordagens destinadas à fitoestabilização do metal na rizosfera do espinafre, evidenciando que a atividade microbiana pode integrar processos de manejo da contaminação e contribuir para modificar as relações entre o elemento, o ambiente edáfico e o sistema vegetal exposto (Sarwar *et al.*, 2023).

Por fim, a caracterização das respostas biológicas diante de concentrações crescentes de contaminantes constitui uma etapa relevante para reconhecer diferenças de sensibilidade e tolerância, especialmente quando microrganismos são considerados para aplicação como bioinsumos em ambientes afetados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Microbiologia Agrícola e Ambiental (LAMAA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). O LAMAA disponibilizou toda a infraestrutura necessária para a execução dos ensaios microbianos, incluindo espaço físico, materiais de consumo e apoio técnico.

3.2 Obtenção dos isolados de microrganismos

Os isolados *Azospirillum brasilense* Abv06 e *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 pertencem à coleção da Embrapa Soja e foram cedidos gratuitamente à UFU para fins de pesquisa. Os isolados de *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 e *Saccharomyces cerevisiae* foram obtidos a partir de um produto comercial. Todos os isolados foram mantidos na coleção do LAMAA e utilizados nos estudos de toxicidade de metais. A escolha desses microrganismos deve-se à sua reconhecida importância para a agricultura brasileira à sua utilização como modelos de células procarióticas e eucarióticas.

3.3 Meios de cultura e cultivo dos microrganismos

Os ensaios foram realizados em dois meios de cultura, conforme descrito na Tabela 1. Os isolados de *A. brasilense* Abv06 e *B. aryabhattai* CMAA 1363 foram cultivados em meio MTEP, nas formas líquida e sólida. O meio YMA foi utilizado para o cultivo de *B. japonicum*, também nas formas líquida e sólida. Os microrganismos foram incubados em *shaker* sob agitação a 150 rpm, ou em incubadora do tipo BOD bacteriológica, à temperatura de 32 °C.

Tabela 1. Composição dos meios de cultura utilizados para o cultivo dos microrganismos.

Meio de cultura	Componentes principais
MTEP	Extrato de levedura (1 g L ⁻¹), triptona (2 g L ⁻¹), peptona (1 g L ⁻¹), sais minerais (K ₂ HPO ₄ (0,5 g L ⁻¹), MgSO ₄ ·7H ₂ O (0,2 g L ⁻¹)), NaCl (5 g L ⁻¹) e ágar (quando sólido) (18 g L ⁻¹).
YMA (Yeast Mannitol Agar)	Manitol (10 g L ⁻¹), extrato de levedura (1 g L ⁻¹), K ₂ HPO ₄ (0,5 g L ⁻¹), MgSO ₄ ·7H ₂ O (0,20 g L ⁻¹), NaCl (0,10 g L ⁻¹) e ágar (quando sólido) (18 g L ⁻¹).

Fonte: YMA (*Yeast Mannitol Agar*), adaptado de Vincent (1970); MTEP, desenvolvido pelo Laboratório de Microbiologia Agrícola e Ambiental (LAMAA).

3.4 Padronização dos inóculos dos isolados

Os isolados pertencentes à coleção do LAMAA foram reativados em meio sólido e incubados em BOD, a 32 °C. A confirmação do crescimento foi realizada com base na morfologia das colônias, após 48 h para *A. brasilense* Abv06, *B. aryabhattai* CMAA 1363, *S. cerevisiae* e após 7 dias para *B. japonicum*. Após o crescimento, os isolados foram repicados para meio de cultura líquido (10 mL) em tubos Falcon de 50 mL e incubados nas mesmas condições de temperatura e agitação (150 rpm). A densidade celular das culturas foi ajustada por meio da densidade óptica a 600 nm (DO₆₀₀), utilizando-se um espectrofotômetro (Biomate 3, Thermo Scientific). Para a determinação da concentração celular, realizou-se a diluição seriada das culturas, e uma alíquota de 100 µL foi semeada em meio de cultura sólido com o auxílio de uma alça de Drigalski. Após a incubação das placas, procedeu-se à contagem das unidades formadoras de colônias (UFC), expressas por volume (mL). O inóculo foi padronizado para uma população de 1×10^5 UFC mL⁻¹, utilizando-se um volume padrão para a inoculação nos ensaios.

3.5 Preparo, esterilização e diluições das soluções de As e Cr

O arsenito foi utilizado como fonte de arsênio trivalente, na forma de óxido de arsênio (As_2O_3 , Sigma-Aldrich), enquanto o arsenato de sódio (Na_2HAsO_4 , Sigma-Aldrich – A1010) foi utilizado como fonte de arsênio pentavalente.

O dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) foi utilizado como fonte de cromo hexavalente. As soluções-estoque foram preparadas em concentração que variaram de 2000 a 8000 mg L^{-1} de As e Cr, por meio da pesagem das respectivas fontes químicas e da posterior dissolução em balão volumétrico com água deionizada. Devido à baixa solubilidade do As_2O_3 em água à temperatura ambiente, o arsenito foi previamente solubilizado. Para isso, a porção correspondente de arsenito foi inicialmente dissolvida em solução de hidróxido de sódio (NaOH , 1 mol L^{-1} - 10 mL L^{-1}), sob agitação, até completa dissolução. Em seguida, a solução foi neutralizada com ácido clorídrico (HCl , 0,5 mol L^{-1} - 20 mL L^{-1}), e o volume final foi ajustado em balão volumétrico. Após o preparo, um volume de 50 mL de cada solução foi esterilizado por filtração em membrana de 0,22 μm (Millex® GS, Merck). As soluções-padrão dos metais foram então diluídas para obtenção das seguintes concentrações finais: 800, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 80, 60, 40, 30, 20, 10 e 5 mg L^{-1} , preparadas em microtubos de 2 mL. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, essas concentrações foram ajustadas conforme as especificidades de cada metal e as respostas observadas nos microrganismos (Tabela 2).

Tabela 2 - Concentrações¹ das soluções-padrão dos metais em relação a cada microrganismo para o teste de toxicidade.

Microrganismo	Concentrações das soluções-padrão de As e Cr (mg L ⁻¹)		
	As ₂ O ₃	Na ₂ HAsO ₄	K ₂ Cr ₂ O ₇
<i>Azospirillum brasilense</i> Abv06	0	0	0
	5	700	5
	10	800	10
	20		20
	30		40
	40		80
	60		100
	80		
	100		
	150		
	200		
<i>Bacillus aryabhattai</i> CMAA 1363	0	0	0
	100	700	5
	200	800	10
	300		20
	400		40
	500		80
	600		100
	700		
	800		
<i>Bradyrhizobium japonicum</i> SEMIA 5079	0	0	0
	5	700	5
	10	800	10
	20		20
	40		40
	60		80
	80		100
	100		
	150		
	200		
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0	0	0
	5	10	5
	10	20	10
	20	30	20
	30	400	40
	40	500	80
	60	600	100
	80	800	
	100		
	150		
	200		

¹ Estas concentrações foram escolhidas com base em ensaios prévios, considerando as fontes dos metais e as respostas dos microrganismos utilizados na pesquisa.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

3.6 Ensaio de toxicidade

Os ensaios de toxicidade com os metais foram realizados em tubos Falcon de 50 mL, contendo 9 mL de meio de cultura MTEP ou YMA. Após a esterilização, adicionou-se 1 mL das soluções-padrão dos metais previamente esterilizadas, resultando em uma diluição de 10

vezes e nas concentrações finais do ensaio. Em seguida, foi adicionada uma alíquota do inóculo previamente ativado, correspondente a uma densidade celular conhecida (1×10^5 UFC mL⁻¹), totalizando 5×10^5 UFC. O ensaio foi conduzido para cada isolado, com quatro repetições, incluindo um tratamento controle, no qual foi adicionado 1 mL de água destilada esterilizada em substituição à solução do contaminante. Posteriormente, os tubos foram incubados nas mesmas condições utilizadas para a padronização dos inóculos. O crescimento dos microrganismos foi avaliado conforme descrito na Tabela 3, por meio da leitura da densidade óptica a 600 nm (OD₆₀₀).

Tabela 3- Tempo de incubação de cada microrganismo para cada leitura de OD.

Microrganismo	1ª leitura	2ª leitura
<i>Azospirillum brasilense</i> Abv06	24 h	48 h
<i>Bradyrizobium japonicum</i> SEMIA 5079	72 h	144 h
<i>Bacillus aryabhatai</i> CMAA 1363	12 h	24 h
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24 h	48 h

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

3.7 Ensaio de sobrevivência e quantificação da mortalidade

Os isolados foram avaliados quanto à sobrevivência ao estresse por metais após os períodos de incubação, por meio da semeadura de uma alíquota em meio sólido, em placas de Petri. Para a contagem das UFC, o inóculo foi previamente calibrado com base na absorbância a 600 nm. Em seguida, realizou-se a diluição de 100 µL do inóculo em 900 µL de solução salina a 0,85% (m/v). Posteriormente, 100 µL da diluição final foram transferidos para placas de Petri contendo os meios de cultivo específicos para cada microrganismo e espalhados com o auxílio de alça de Drigalski. O ensaio foi conduzido com quatro repetições em cada cultivo. Entre as leituras de absorbância, novas diluições e novos plaqueamentos foram realizados, seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente. As placas foram incubadas em estufa bacteriológica a 32 °C. Após o crescimento dos microrganismos, procedeu-se à contagem das UFCs. Os resultados obtidos foram utilizados para avaliar a mortalidade dos microrganismos expostos aos metais, em comparação com o tratamento controle.

3.8 Análises estatísticas

Os dados foram ajustados por regressão não linear utilizando o modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), conforme descrito por Ritz *et al.* (2015), amplamente empregado em

estudos de dose–resposta, que permite descrever a relação entre a dose do contaminante e a resposta biológica. O modelo foi representado pela equação:

$$y = c + (d - c) / [1 + \exp(b (\ln(x) - \ln(e)))],$$

em que y representa a resposta biológica observada, x a dose do contaminante, c o limite inferior da curva, d o limite superior, b a inclinação da curva no ponto de inflexão e e a dose efetiva correspondente a 50% da resposta (ED_{50}).

A partir do modelo ajustado, foram determinadas as faixas de tolerância, toxicidade e mortalidade dos microrganismos. As análises estatísticas e a construção dos gráficos foram realizadas no software R (versão 4.2.0), sendo os parâmetros do modelo considerados significativos quando $p < 0,05$.

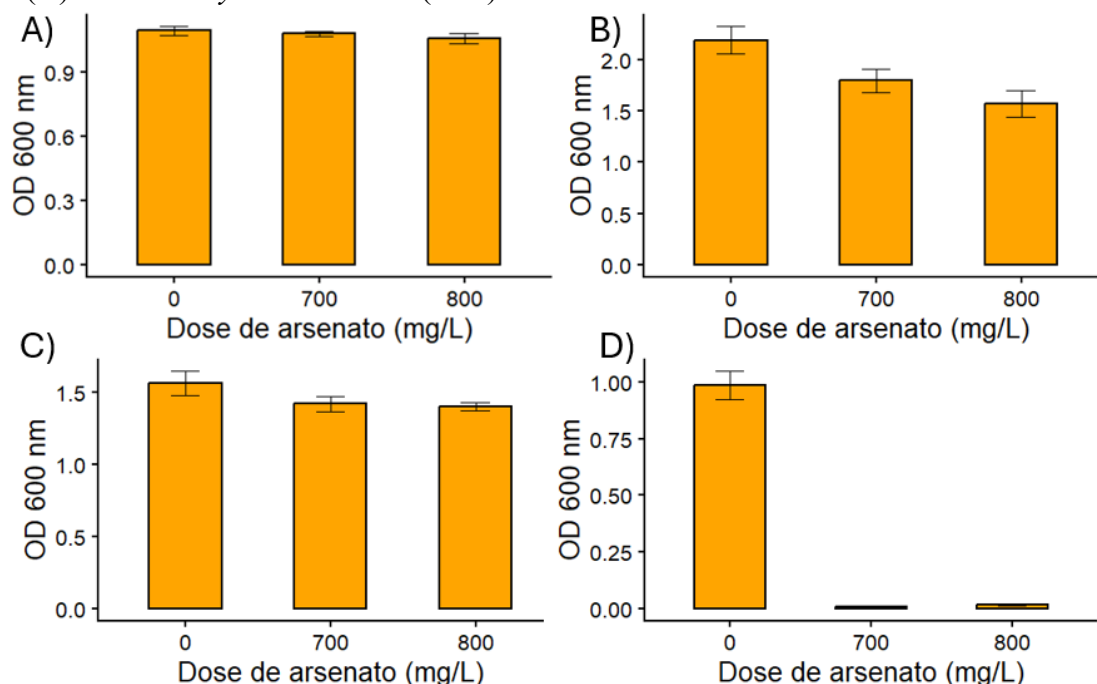
4. RESULTADOS

4.1 Efeito da toxicidade do arsênio

4.1.1 Arsenato

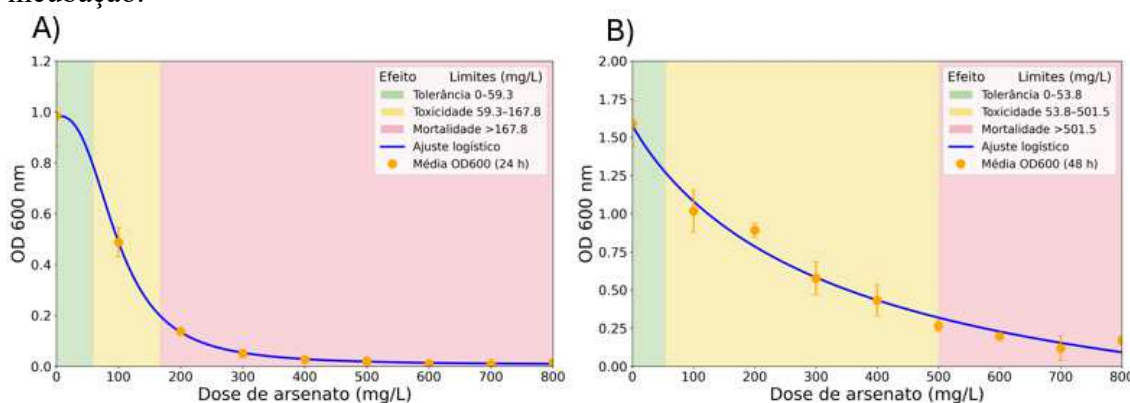
Os ensaios da primeira leitura indicaram que o arsenato não afetou o crescimento de *A. brasilense* Abv06, *B. japonicum* SEMIA 5079 e *B. aryabhattai* CMAA 1363 nas doses avaliadas (Figura 1). Em contraste, o crescimento de *S. cerevisiae* foi afetado nas doses preliminares de arsenato, evidenciando sensibilidade do microrganismo ao composto. Diante desse efeito, novos ensaios foram conduzidos com *S. cerevisiae* para a modelagem da toxicidade do arsenato em 24 h e 48 h de incubação. O modelo log-logístico de quatro parâmetros apresentou bom ajuste aos dados experimentais ($R^2 > 0,98$), com parâmetros estatisticamente significativos (Figura 2). Observou-se que o efeito do arsenato foi mais pronunciado em 24 h de incubação, com maior redução da densidade óptica ao longo das doses avaliadas. Em 48 h, por outro lado, o efeito tóxico foi atenuado, indicando maior tolerância da levedura às doses mais elevadas nesse período de incubação.

Figura 1 - Efeito de diferentes doses de arsenato de sódio sobre a multiplicação de diferentes microrganismos em distintos tempos de incubação: (A) *Azospirillum brasilense* Abv06 (24 h); (B) *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (72 h); (C) *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (12 h); e (D) *Saccharomyces cerevisiae* (24 h).



Nota: As colunas representam a média das repetições, e as barras de erro representam o desvio-padrão.
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 2 - Curvas dose-resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4) para *Saccharomyces cerevisiae* (A–B) exposta a diferentes doses de arsenato em 24 h e 48 h. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação.



Nota: Os pontos representam os valores médios experimentais, enquanto as linhas representam o ajuste do modelo.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 4 - Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta de *Saccharomyces cerevisiae* exposta ao arsenato pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4).

Figura 2	Microrganismo	Tempo (h)	Equação	R²
A	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24	$y = 0.0063 + (0.9865 - 0.0063) / [1 + \exp(2.6852 \times (\ln(x) - \ln(98.8041)))]$	0,99
B		48	$y = 0.6095^* + (1.6816 - 0.6095) / [1 + \exp(0.8798^* \times (\ln(x) - \ln(327.6408^*)))]$	0,98

Nota: (*) Valores não significativos ao nível de 5% de probabilidade ($p \geq 0,05$).

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

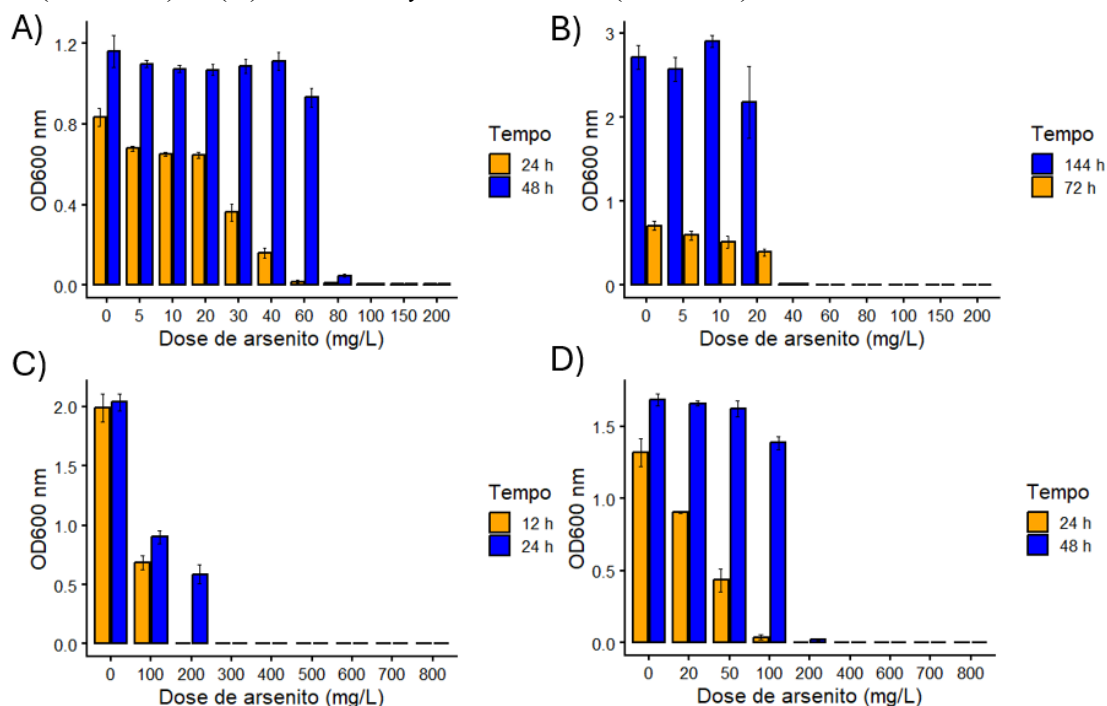
4.1.2 Arsenito

Os resultados demonstram que o efeito da toxicidade do arsenito sobre o crescimento microbiano depende do microrganismo, da dose aplicada e do tempo de incubação. Os isolados de *Azospirillum brasilense* Abv06 e *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 apresentaram redução da densidade óptica com o aumento da dose de arsenito na solução de crescimento, sendo *B. japonicum* SEMIA 5079 o isolado mais sensível ao composto (Figura 3A - B).

Para ambos os microrganismos, observou-se que o maior tempo de incubação resultou em valores mais elevados de densidade óptica em comparação ao menor tempo avaliado. Esse resultado indica maior tolerância ao estresse por arsenito com o aumento do tempo de exposição.

Por sua vez, *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 e *Saccharomyces cerevisiae* apresentaram maior tolerância à toxicidade do arsenito, mantendo valores mais elevados de densidade óptica ao longo das doses avaliadas, especialmente na segunda avaliação realizada durante o período de incubação (Figura 3C - D). Para ambos os microrganismos, o efeito tóxico do arsenito foi mais pronunciado na primeira avaliação, enquanto na segunda observou-se recuperação parcial do crescimento sob condições de estresse por arsenito.

Figura 3 - Efeito do arsenito sobre a densidade óptica (OD600 nm) de diferentes microrganismos em distintos tempos de incubação. (A) *Azospirillum brasilense* Abv06 (24 e 48 h); (B) *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (72 e 144 h); (C) *Bacillus aryabhatai* CMAA 1363 (12 e 24 h); e (D) *Saccharomyces cerevisiae* (24 e 48 h).



Nota: As colunas representam a média das repetições, e as barras de erro representam o desvio-padrão.
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

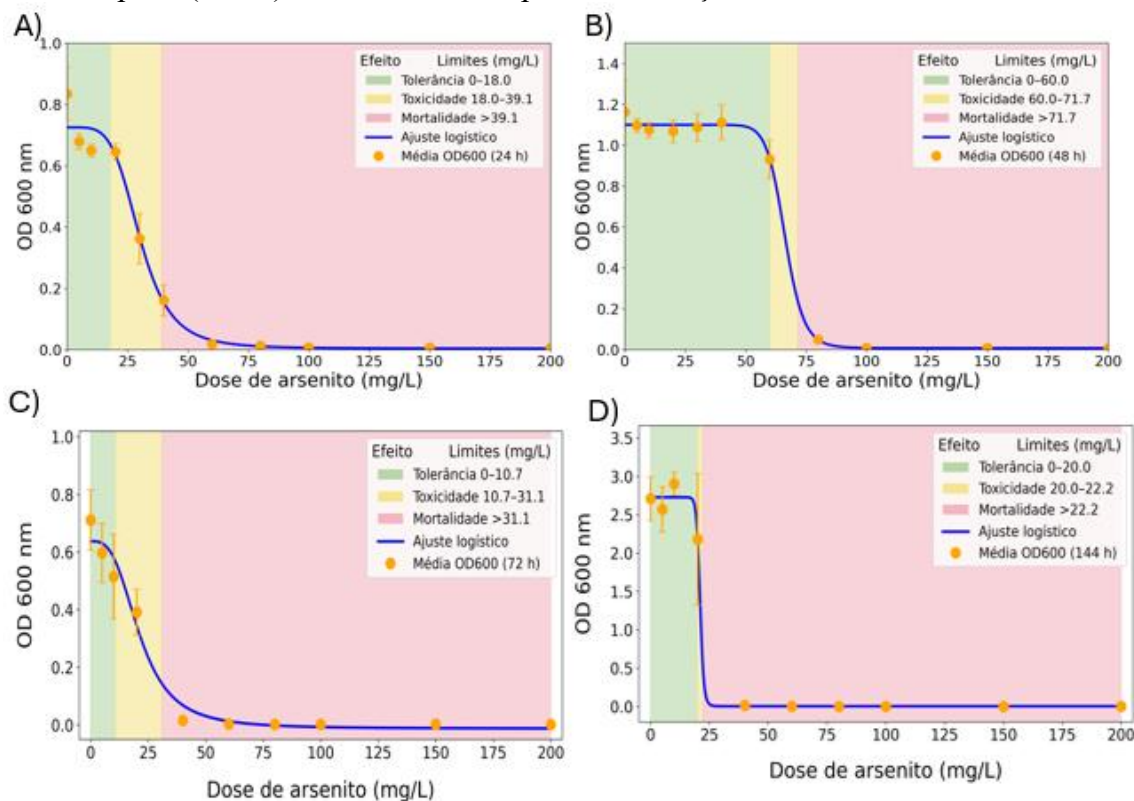
Os ensaios de toxicidade do arsenito realizados com os isolados apresentaram bom ajuste ao modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), conforme apresentado nas Figuras 4 e 5. Para *A. brasilense* Abv06, tanto no período de incubação de 24 h quanto de 48 h, observou-se ajuste do modelo, com R^2 superiores a 98%, sendo ainda mais elevado em 48 h ($R^2 > 99\%$), indicando adequada representação da resposta biológica ao aumento da dose de arsenito (Figuras 4 A - B).

A resposta de *B. japonicum* SEMIA 5079 também se ajustou significativamente ao modelo LL.4, apresentando valores de R^2 superiores aos observados para *A. brasilense* Abv06, o que evidência elevada consistência do ajuste matemático aos dados experimentais. A partir dos parâmetros estimados pelos modelos, verificou-se que *B. japonicum* apresenta menor tolerância e maior sensibilidade ao estresse por arsenito quando comparado a *A. brasilense* Abv06 (Tabela 5). Em termos de mortalidade, *B. japonicum* apresentou supressão do crescimento em concentrações superiores a $22,2 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto para *A. brasilense* Abv06 a mortalidade foi observada apenas em doses mais elevadas, a partir de $71,7 \text{ mg L}^{-1}$ na segunda leitura, evidenciando maior resistência deste microrganismo ao arsenito.

O isolado de *B. aryabhatai* CMAA 1363 apresentou bom ajuste às doses de arsenito em 12 h; no entanto, houve redução do ajuste em 24 h (Figura 5 A-B). *Saccharomyces cerevisiae*

foi afetada pelas doses de arsenito, mas não apresentou resposta típica que permitisse a determinação da toxicidade e mortalidade nas doses avaliadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), apresentando maior tolerância a altas doses de arsenito em 48 h (Figuras 5 C-D).

Figura 4 - Curvas dose-resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4) para *Azospirillum brasilense* Abv06 (A-B), *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (C-D) expostos a diferentes doses de arsenito. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação.



Nota: Os pontos representam os valores médios experimentais, e as linhas, o ajuste do modelo.
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

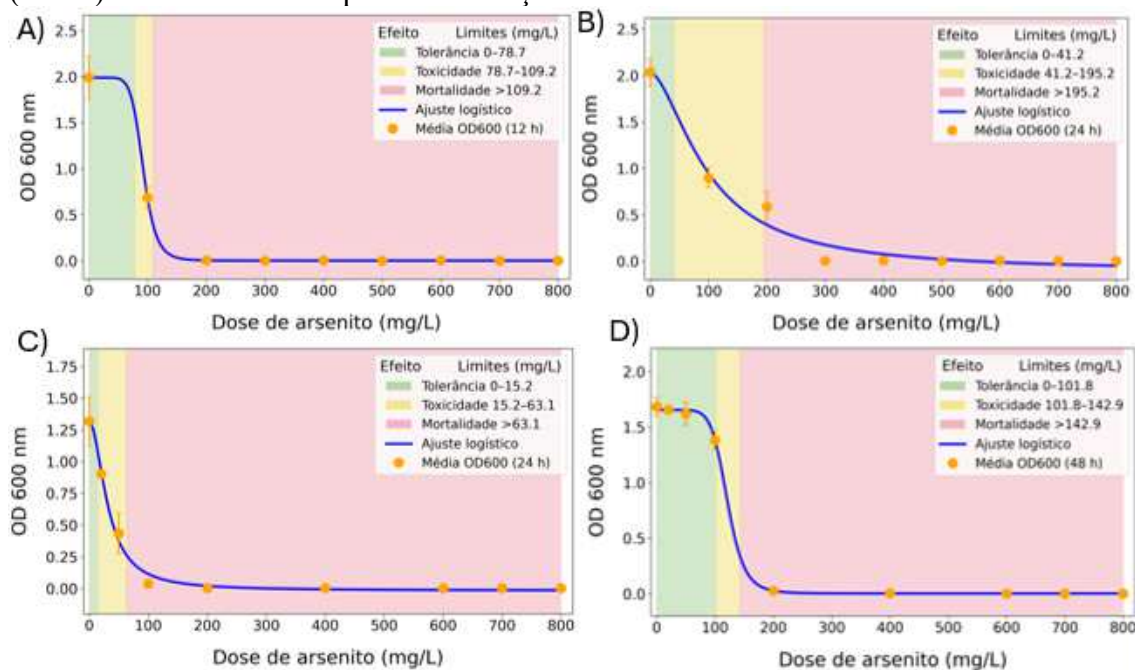
Tabela 5 - Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta dos microrganismos *A. brasilense* Abv06 e *B. japonicum* SEMIA 5079 expostos ao arsenito pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4).

Figura	Microrganismo	Tempo (h)	Equação	R ²
4				
A	<i>Azospirillum brasilense</i> Abv06	24	$y = 0.0089^* + (0.727 - 0.0089) / [1 + \exp(4.5285 \times (\ln(x) - \ln(30.06)))]$	0,98
B		48	$y = 0.0078^* + (1.1002 - 0.0078) / [1 + \exp(17.1746 \times (\ln(x) - \ln(66.258)))]$	0,99
C	<i>Bradyrhizobium japonicum</i> SEMIA 5079	72	$y = -0.0127^* + (0.6376 - (-0.0127)) / [1 + \exp(3.0943 \times (\ln(x) - \ln(21.3497^*)))]$	0,97
D		144	$y = 0.0044^* + (2.7278 - 0.0044) / [1 + \exp(14.1406 \times (\ln(x) - \ln(22.0554^*)))]$	0,99

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Nota: (*) Valores não significativos ao nível de 5% de probabilidade ($p \geq 0,05$).

Figura 5 - Curvas dose–resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4), *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (A–B) e *Saccharomyces cerevisiae* (C–D) expostos a diferentes doses de arsenito. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação.



Nota: Os pontos representam os valores médios experimentais e as linhas o ajuste do modelo.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 6 - Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta dos microrganismos *B. aryabhattai* CMAA 1363 e *S. cerevisiae* expostos ao arsenito pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4).

Figura 5	Microrganismo	Tempo (h)	Equação	R²
A	<i>Bacillus aryabhattai</i> CMAA 1363	12	$y = 0.0025 + (1.99 - 0.0025) / [1 + \exp(8.488 \times (\ln(x) - \ln(92,6472)))]$	1,0
B		24	$y = -0.226^* + (2.1187 - (-0.226) / [1 + \exp(1.3365^* \times (\ln(x) - \ln(108.8014)))]$	0,94
C	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24	$y = -0.0153^* + (1.3145 - (-0.0153) / [1 + \exp(1.9334 \times (\ln(x) - \ln(31.7152)))]$	0,99
D		48	$y = 0.003^* + (1.6661 - 0.003) / [1 + \exp(8.4145 \times (\ln(x) - \ln(120.7402)))]$	0,99

Nota: (*) Valores não significativos ao nível de 5% de probabilidade ($p \geq 0,05$).

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 7 - Concentrações de óxido de arsênio (arsenito) de tolerância, toxicidade e mortalidade para *Azospirillum brasilense* Abv06 e *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 em diferentes tempos de incubação, estimados pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4).

Microrganismo	Tempo (h)	Tolerância (mg L ⁻¹)	Toxicidade (mg L ⁻¹)	Mortalidade (mg L ⁻¹)
<i>Azospirillum brasilense</i>	24	< 18	18 – 39,1	> 39,1
<i>Azospirillum brasilense</i>	48	< 60	60 – 71,7	> 71,7
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	72	< 10,7	10,7 – 31,1	> 31,1
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	144	< 20,0	20,0 – 22,2	> 22,2

Nota: Tolerância corresponde a $\geq 80\%$ da resposta máxima; mortalidade a $\leq 20\%$; e toxicidade à faixa intermediária entre esses limites.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 8 - Concentrações de óxido de arsênio (arsenito) de tolerância, toxicidade e mortalidade para *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 e *Saccharomyces cerevisiae* em diferentes tempos de incubação, estimados pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4).

Microrganismo	Tempo (h)	Tolerância (mg L ⁻¹)	Toxicidade (mg L ⁻¹)	Mortalidade (mg L ⁻¹)
<i>Bacillus aryabhattai</i>	12	< 78,7	78,7 – 109,2	> 109,2
<i>Bacillus aryabhattai</i>	24	< 41,2	41,2 – 195,2	> 195,2
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24	< 15,2	15,2 – 63,1	> 63,1
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	48	< 101,8	101,8 – 142,9	> 142,9

Nota: Tolerância corresponde a $\geq 80\%$ da resposta máxima; mortalidade a $\leq 20\%$; e toxicidade à faixa intermediária entre esses limites.

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

4.2 Efeito da toxicidade do cromo

Os ensaios realizados com cromo evidenciaram que esse metal apresenta elevada toxicidade para o crescimento de *A. brasilense* Abv06 e *B. rhizobium japonicum* SEMIA 5079 (Figura 6A- B). Observou-se que concentrações a partir de 5 mg L⁻¹ de Cr promoveram inibição acentuada do crescimento, com densidade óptica próxima de zero, indicando alta sensibilidade desses microrganismos ao metal.

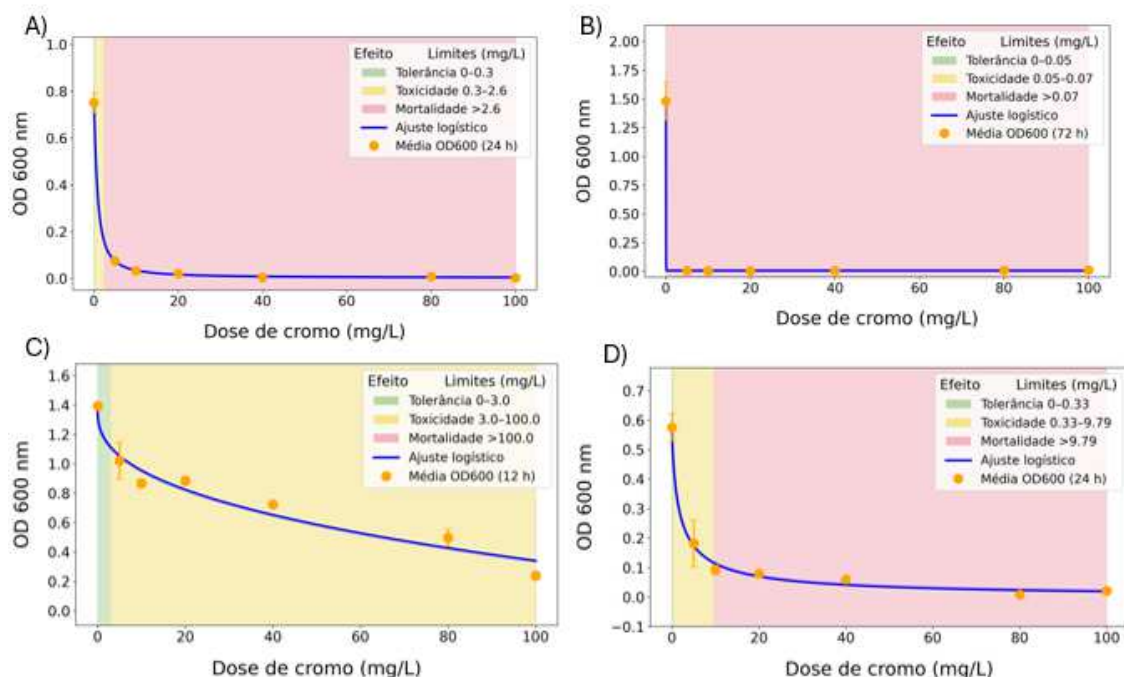
Diferentemente do observado para o arsênio, não houve variação significativa da resposta em função do tempo de incubação, uma vez que tanto nos períodos iniciais quanto nos mais prolongados, o crescimento permaneceu fortemente suprimido nas doses avaliadas.

De acordo com o ajuste do modelo log-logístico (LL.4), as curvas indicam uma queda abrupta da resposta biológica nas menores concentrações testadas. Dessa forma, dentro do intervalo experimental avaliado, não foi possível determinar adequadamente os limites de tolerância e toxicidade, pois a inibição ocorreu em concentrações muito baixas, limitando a definição de uma faixa intermediária de resposta.

O isolado de *B. aryabhattai* CMAA 1363 apresentou crescimento ao longo de toda a faixa de concentrações avaliadas (Figura 6 C). Observou-se manutenção da densidade óptica entre 5 e 100 mg L⁻¹ de Cr, indicando maior tolerância ao metal em comparação aos demais microrganismos. Contudo, a resposta foi dose-dependente, com redução gradual do crescimento à medida que a concentração de cromo aumentou, evidenciando efeito tóxico proporcional à dose aplicada.

Para o isolado de *S. cerevisiae*, verificou-se elevada sensibilidade ao cromo nas primeiras 24 h de incubação, com acentuada redução do crescimento já a partir de 5 mg L⁻¹ (Figura 6 D). Entretanto, após 48 h, observou-se recuperação parcial da densidade óptica nas concentrações avaliadas, sugerindo possível adaptação fisiológica ao estresse metálico.

Figura 6 - Curvas dose–resposta ajustadas pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4) para *Azospirillum brasilense* Abv06 (A), *Bradyrhizobium japonicum* SEMIA 5079 (B), *Bacillus aryabhattai* CMAA 1363 (C) e *Saccharomyces cerevisiae* (D) expostos a diferentes doses de cromo. O crescimento microbiano foi avaliado por densidade óptica (OD₆₀₀) em diferentes tempos de incubação.



Nota: Os pontos representam os valores médios experimentais, e as linhas, o ajuste do modelo.
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 9 - Parâmetros do ajuste das curvas dose–resposta dos microrganismos expostos ao cromo pelo modelo log-logístico de quatro parâmetros (LL.4).

Figura 5	Microrganismo	Tempo (h)	Equação	R ²
A	<i>Azospirillum brasilense</i> Abv06	24	$y = 0.0035^* + (1.4152 - 0.0035) / [1 + \exp(1.3213 \times (\ln(x) - \ln(0.5468)))]$	0,99
B	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	72	$y = 0.0063^* + (1.5765 - 0.0063) / [1 + \exp(4.949^* \times (\ln(x) - \ln(0.8654)))]$	1,00
C	<i>Bacillus aryabhattai</i> CMAA 1363	12	$y = -2.5293^* + (1.5676 - (-2.5293)) / [1 + \exp(0.383^* \times (\ln(x) - \ln(961.7786^*)))]$	0,94
D	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	24	$y = -0.0075^* + (1.3565^* - (-0.075)) / [1 + \exp(0.6827 \times (\ln(x) - \ln(0.325^*)))]$	0,99

Nota: (*) Valores não significativos ao nível de 5% de probabilidade ($p \geq 0,05$).
Fonte: Elaborado pela autora (2026).

4.3 Mortalidade de microrganismos em exposição ao arsenito

Os resultados apresentados na Tabela 10 evidenciam que a resposta à exposição ao arsenito é dependente do microrganismo e do tempo de incubação, com diferenças quanto à mortalidade celular.

Para *A. brasilense* Abv06, no período de 24 a 48 h, a mortalidade variou de 43,18% a 87,27% (Tabela 10). Esse percentual aumentou de forma progressiva com o incremento da dose e do tempo de exposição ao arsenito. Em todas as doses avaliadas, observou-se maior mortalidade no período de 48 h em comparação a 24 h, indicando que a continuidade da exposição potencializou o efeito tóxico do arsênio sobre a viabilidade celular desse isolado.

Para *B. japonicum* SEMIA 5079, observou-se maior sensibilidade ao arsênio, especialmente com o aumento do tempo de exposição (Tabela 10). Na dose de 200 mg L⁻¹, a mortalidade atingiu 90,78% em 72 h e 100% em 144h, evidenciando efeito tóxico acentuado e dependente do tempo de incubação. Nas doses intermediárias (60 e 80 mg L⁻¹), a mortalidade variou entre 22,22% e 93,56%. Na menor dose (40 mg L⁻¹), não foi observada mortalidade, indicando que, nessa concentração, não houve redução detectável da viabilidade celular.

Em *B. aryabhattai* CMAA 1363, observou-se elevada tolerância ao arsenito durante as primeiras 12 h de incubação, com mortalidade variando entre 2,04% e 12,65%, mesmo nas maiores doses avaliadas (Tabela 10). Entretanto, após 24 h de exposição, verificou-se aumento expressivo da mortalidade nas concentrações mais elevadas, atingindo 55,10% na dose de 700 mg L⁻¹ e 85,06% na dose de 800 mg L⁻¹. Em contrapartida, nas doses de 200 e 500 mg L⁻¹, não foi observada mortalidade após 24 h, indicando manutenção da viabilidade celular nessas concentrações.

Para *S. cerevisiae*, a maior mortalidade foi observada na dose de 200 mg L⁻¹ (46,20% em 24h e 85,84% em 48 h) (Tabela 10). Entretanto, nas doses de 150, 80 e 20 mg L⁻¹, não foi observada mortalidade após 48 h. Além disso, houve aumento na contagem de UFC, indicando maior sobrevivência e crescimento celular no maior tempo de incubação e ausência de efeito tóxico detectável nessas concentrações.

Tabela 10 - Efeito de doses de arsenito sobre a multiplicação e o percentual de mortalidade dos isolados microbianos, em diferentes períodos de incubação, com determinação por contagem em placa após exposição ao metal.

Doses As ³ mg L ⁻¹	<i>Azospirillum brasilense</i> Abv06			
	Log, UFC mL ⁻¹		Mortalidade	
	24h	48h	24h	48h
200	5,93	5,75	80,45%	87,27%
80	6,19	6,06	65,00%	73,86%
60	6,26	6,15	58,41%	67,73%
40	6,32	6,40	52,95%	43,18%
<i>Bradyrhizobium japonicum</i> SEMIA 5079				
	72h	144h	72h	144h
200	5,92	0	90,78%	100%
80	6,24	5,76	80,78%	93,56%
60	6,85	6,75	22,22%	37,78%
40	10,08	9,77	0	0
<i>Bacillus aryabhattai</i> CMAA 1363				
	12h	24h	12h	24h
800	5,03	5,16	12,65%	85,06%
700	5,06	5,19	5,31%	55,10%
500	5,05	4,74	9,39%	0
200	5,08	4,26	2,04%	0
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>				
	24h	48h	24h	48h
200	4,66	4,08	46,20%	85,84%
150	4,85	5,92	16,96%	0
80	5,51	7,43	0	0
20	6,88	7,6	0	0

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

4.4 Mortalidade de microrganismos em exposição ao cromo

A exposição dos microrganismos ao cromo mostra uma alta toxidez do elemento dos períodos de incubação da maioria dos isolados (Tabela 11). Para *A. brasilense* Abv06 a porcentagem de mortalidade variou de 94,32 a 100%, sendo do que o período de incubação de 48h a mortalidade foi maior. O isolado de *B. japonicum* SEMIA 5079 não sobreviveu a exposição do cromo nos períodos de incubação provavelmente devido ao longo tempo de exposição. O *B. aryabhattai* CMAA 1363 apresentou uma porcentagem de mortalidade de 84,00% a 97,47%. Os resultados mostram que o isolado de *S. cerevisiae* tem uma menor porcentagem de mortalidade em comparação aos demais microrganismos, possivelmente pode ser associado a uma célula eucariótica, cujo mecanismos podem mudar os danos celulares do cromo.

A exposição dos microrganismos às doses de 10 a 100 mg L⁻¹ de cromo evidenciou elevada toxicidade do metal, com respostas distintas entre os isolados e forte influência do tempo de incubação.

Para *A. brasiliense* Abv06, a mortalidade variou de 94,32% a 100%. Observa-se que, em 48 h, a mortalidade foi mais acentuada em todas as doses avaliadas. Nas concentrações de 100 e 80 mg L⁻¹, verificou-se mortalidade de 100% em 48h, indicando ausência total de células viáveis após esse período. Nas doses de 40 e 10 mg L⁻¹, embora não tenha ocorrido mortalidade total, os valores permaneceram elevados (99,92% e 99,70%, respectivamente, em 48h), demonstrando alta sensibilidade do isolado ao cromo e efeito tóxico dependente do tempo de exposição (Tabela 11).

Para *B. japonicum* SEMIA 5079, foi registrada mortalidade de 100% nas condições avaliadas, indicando ausência de crescimento em placa após exposição ao cromo. Esse resultado evidencia elevada sensibilidade do isolado ao metal, sugerindo que as concentrações testadas foram suficientes para comprometer completamente a viabilidade celular (Tabela 11).

Em *B. aryabhatai* CMAA 1363, a mortalidade variou de 84,00% a 97,47%. Após 12 h de incubação, a menor mortalidade foi observada na dose de 80 mg L⁻¹ (84,00%), enquanto a maior ocorreu na dose de 20 mg L⁻¹ (96,82%). Após 24 h, verificou-se aumento da mortalidade em praticamente todas as concentrações, alcançando 98,86% na dose de 80 mg L⁻¹. Esses resultados demonstram que, embora o isolado tenha apresentado elevada mortalidade, o aumento do tempo de exposição intensificou o efeito tóxico do metal (Tabela 11).

Para *S. cerevisiae*, foram observadas menores porcentagens de mortalidade em comparação aos isolados bacterianos. Os valores variaram de 0% a 84,91%. Nas doses de 20 e 10 mg L⁻¹, não houve mortalidade em 48 h, enquanto nas concentrações mais elevadas (100 e 80 mg L⁻¹) a mortalidade permaneceu abaixo de 84,91%. Esses resultados indicam maior tolerância do isolado ao cromo, possivelmente associada às características estruturais e fisiológicas da célula eucariótica (Tabela 11).

Tabela 11 - Efeito de doses de cromo sobre a multiplicação e o percentual de mortalidade dos isolados microbianos, em diferentes períodos de incubação, avaliados por contagem em placa após exposição ao metal.

Doses As ³ mg L ⁻¹	<i>Azospirillum brasilense</i> Abv06			
	Log, UFC mL ⁻¹		Mortalidade	
	24h	48h	24h	48h
100	3,64	0	99,76%	100%
80	4,77	0	96,81%	100%
40	4,59	3,18	97,89%	99,92%
10	5,02	3,74	94,32%	99,70%
<i>Bradyrhizobium japonicum</i> SEMIA 5079				
	72h	144h	72h	144h
200	0	0	100%	100%
80	0	0	100%	100%
60	0	0	100%	100%
40	0	0	100%	100%
<i>Bacillus aryabhatai</i> CMAA 1363				
	12h	24h	12h	24h
100	3,56	3,49	97,06%	97,47%
80	4,29	3,15	84,00%	98,86%
40	5,24	3,91	85,71%	93,31%
20	3,59	3,53	96,82%	97,22%
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>				
	24h	48h	24h	48h
100	4,78	4,85	29,82%	18,13%
80	4,67	4,11	45,03%	84,91%
20	5,60	6,04	0	0
10	5,36	6,09	0	0

Fonte: Elaborado pela autora (2026).

5. DISCUSSÃO

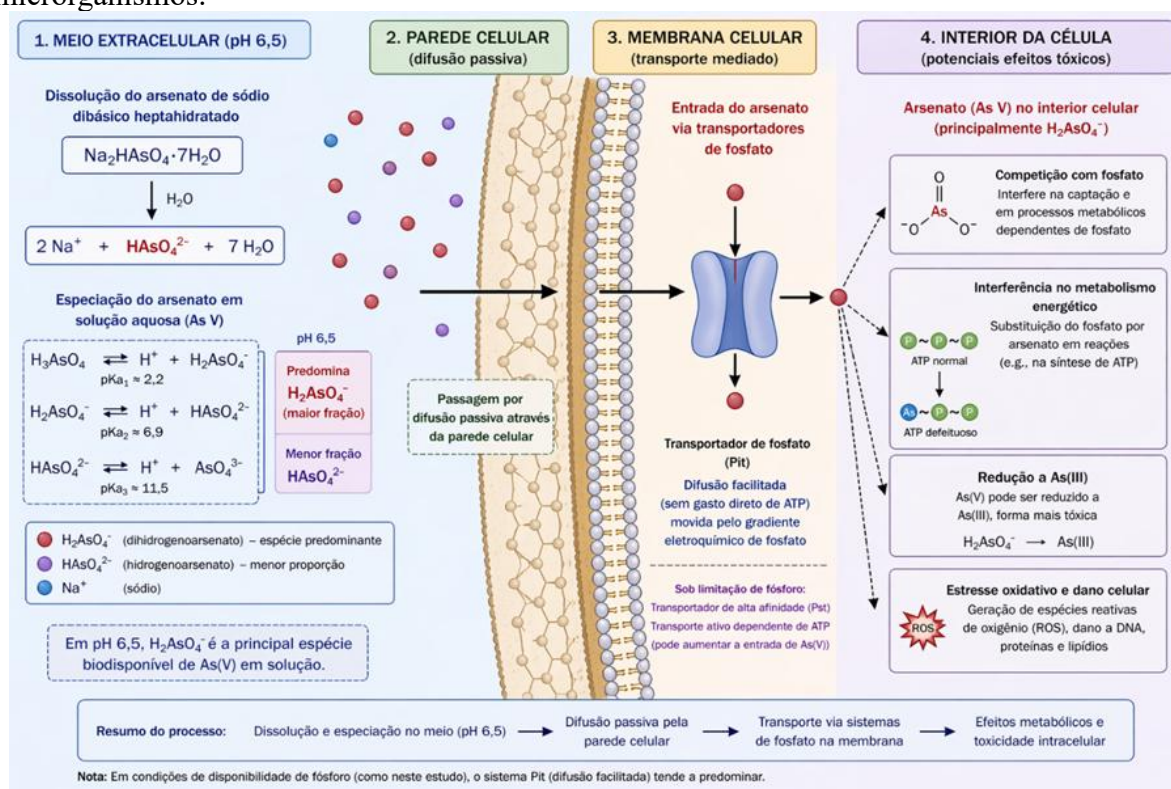
Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a exposição de microrganismos utilizados como bioinsumos a diferentes concentrações de arsênio trivalente e pentavalente, bem como ao cromo hexavalente, resulta em diferentes níveis de tolerância, toxicidade e mortalidade, evidenciando os riscos associados à contaminação do solo por estes elementos potencialmente tóxicos. No contexto agrícola, a presença de arsênio e cromo nos solos representa uma preocupação relevante, uma vez que a ocorrência desses contaminantes pode afetar os componentes biológicos desses ambientes. Nesse sentido, as diferenças de resposta observadas entre os microrganismos podem estar relacionadas às suas características fisiológicas, estruturais e genéticas, bem como à presença de diferentes mecanismos de adaptação e resistência ao estresse químico. Esses aspectos exigem uma abordagem integrada para a compreensão das respostas observadas (Gadd, 2010). Além disso, a avaliação de microrganismos amplamente utilizados como bioinsumos, como *B. japonicum*, *A. brasilense*,

B. aryabhatai e *S. cerevisiae*, reforça a relevância desses estudos para a agricultura brasileira, uma vez que tais organismos desempenham papel central na promoção do crescimento vegetal, na ciclagem de nutrientes e no controle biológico nos sistemas agrícolas.

5.1 Toxicidade do arsenato (As^{5+}) nos microrganismos

O arsenato constitui uma fonte solúvel de arsênio que, em geral, apresenta menor potencial tóxico em comparação ao arsenito. No entanto, em elevadas concentrações, pode tornar-se altamente biodisponível e, consequentemente, tóxico aos microrganismos, conforme ilustrado no esquema da Figura 7. Neste trabalho, a fonte de As utilizada foi o arsenato de sódio dibásico, adicionado ao meio de cultivo específico para cada microrganismo. Em solução aquosa, o arsenato dissocia-se rapidamente, formando espécies aniônicas cuja distribuição depende do pH. Em pH 6,5, predominam as formas H_2AsO_4^- e, em menor proporção, HAsO_4^{2-} , sendo a primeira a principal responsável pela biodisponibilidade do As^{5+} , devido à sua similaridade estrutural com o fosfato e à consequente assimilação por sistemas de transporte celular.

Figura 7 - Dissolução, especiação e biodisponibilidade do arsenato (As^{5+}) em meio de cultivo (pH 6,5), transporte através da membrana celular e potenciais mecanismos de toxicidade em microrganismos.



Fonte: Figura elaborada com auxílio do ChatGPT/OpenAI, com base em Maciaszczyk-Dziubinska, Wawrzycka e Wysocki (2012), Garbinski, Rosen e Chen e Tanaka, Matsushashi e Ogra (2025).

Os resultados obtidos com arsenato de sódio indicam baixa toxicidade para a maioria dos microrganismos avaliados nas doses aplicadas. Observou-se que *A. brasilense*, *B. japonicum* e *B. aryabhattai* mantiveram crescimento relativamente estável nas maiores concentrações, evidenciando elevada tolerância a essa forma química do arsênio. Em contraste, *S. cerevisiae* apresentou maior sensibilidade ao arsenato, com redução da densidade óptica mesmo em concentrações mais baixas. Essa resposta pode ser explicada não apenas pela similaridade estrutural entre o arsenato e o fosfato, que favorece sua entrada celular por sistemas de transporte específicos, mas também pela natureza eucariótica da levedura. Em células eucarióticas, como *S. cerevisiae*, o arsenato pode interferir de forma mais ampla em processos metabólicos intracelulares altamente organizados e compartimentalizados, especialmente na produção de ATP e em vias energéticas dependentes de fosfato (Etesami; Jeong; Raheb, 2023). Ademais, a substituição do fosfato por arsenato em reações bioquímicas pode levar à formação de compostos instáveis, comprometendo a eficiência metabólica e resultando em redução do crescimento celular. Embora a levedura possua mecanismos de detoxificação, como compartimentalização vacuolar e sistemas antioxidantes, tais mecanismos podem ser rapidamente saturados, levando ao acúmulo intracelular do metaloide.

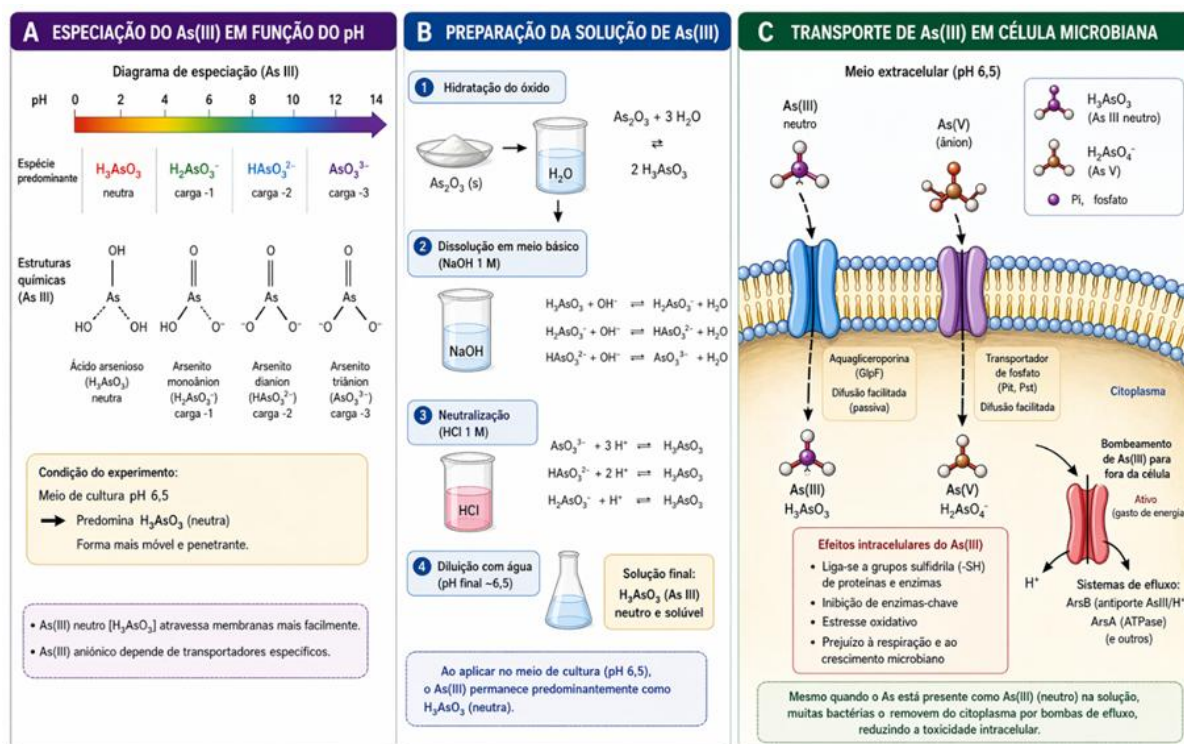
Além disso, a transformação microbiana entre As^{5+} e As^{3+} é um processo determinante para a toxicidade e a mobilidade do arsênio no ambiente, reforçando que a resposta observada depende não apenas da exposição ao contaminante, mas também de sua especiação química e da atividade microbiana associada (Liu *et al.*, 2026). De modo geral, o arsenato apresenta menor reatividade em comparação ao arsenito, atuando de forma indireta no metabolismo celular, o que favorece maior adaptação dos microrganismos procarióticos (Liu *et al.*, 2026). Esses, por sua vez, podem apresentar maior tolerância devido à presença de mecanismos de resistência, como sistemas de efluxo e processos de detoxificação do arsênio, o que contribui para as diferenças observadas entre os isolados avaliados (Chen *et al.*, 2020; Gadd, 2010).

5.2 Toxicidade do arsenito (As^{3+}) nos microrganismos

A fonte de As^{3+} utilizada no experimento foi o trióxido de arsênio (As_2O_3), que apresenta baixa solubilidade em água. Assim, para sua utilização nos ensaios, foi necessária uma dissolução prévia em solução alcalina, seguida de neutralização com solução de ácido clorídrico (Figura 8). Posteriormente, a solução foi diluída em água destilada para aplicação nos meios de cultura destinados ao crescimento dos microrganismos. As reações químicas envolvidas nesse processo resultam na formação de ácido arsenioso (H_3AsO_3), espécie predominante de As(III) em pH próximo à neutralidade. Nessas condições, o As(III) encontra-se predominantemente

como uma espécie neutra. Essa característica favorece seu transporte através de proteínas de membrana, como aquagliceroporinas, e contribui para sua elevada toxicidade celular (Bhattacharjee *et al.*, 2008).

Figura 8 - Esquema da especiação química do As^{3+} , do preparo da solução e do transporte em células microbianas. (A) Distribuição das espécies de As (III) em função do pH. (B) Etapas de preparo da solução de As (III) a partir de As_2O_3 . (C) Transporte de As (III) na célula e bombeamento externo.



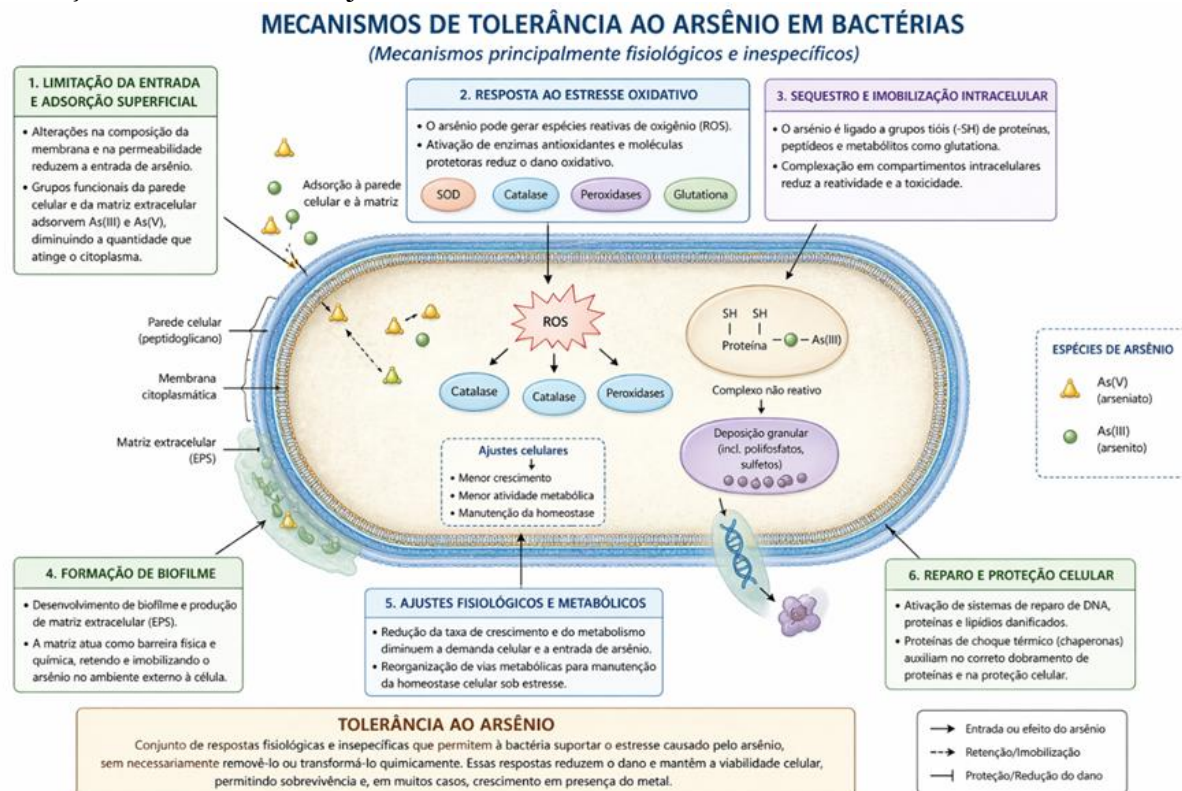
Fonte: Figura elaborada com auxílio do ChatGPT/OpenAI, com base em Maciaszczyk-Dziubinska, Wawrzycka e Wysocki (2012), Yang *et al.* (2015) e Garbinski, Rosen e Chen (2019).

Os resultados dos ensaios experimentais demonstram elevada toxicidade do As (III) para os microrganismos avaliados, evidenciada pela redução da densidade óptica com o aumento das concentrações, embora a intensidade da resposta tenha variado entre os organismos e os tempos de avaliação. Essa resposta pode estar relacionada à elevada reatividade química do arsenito, que apresenta alta afinidade por grupos sulfidríla (-SH) presentes em proteínas, podendo comprometer a estrutura e a função dessas proteínas e, consequentemente, diferentes processos celulares (Bhattacharjee *et al.*, 2008). Diferentemente do arsenato, cuja ação é predominantemente indireta por substituição do fosfato, o arsenito atua diretamente sobre a estrutura e a função de biomoléculas, promovendo desorganização celular e estresse oxidativo (Liu *et al.*, 2026).

5.3 Limites dos efeitos da concentração e exposição ao As^{3+}

Os dados de crescimento dos microrganismos expostos a diferentes concentrações de As^{3+} foram ajustados a um modelo log-logístico de quatro parâmetros, comumente utilizado para delimitar os efeitos de tolerância, toxicidade e mortalidade. Os resultados indicaram que as concentrações de tolerância variaram de 10,7 a 101,8 mg As L⁻¹, com variações dependentes do microrganismo e do tempo de exposição. Observou-se que *B. japonicum* apresentou menor tolerância ao arsenito, enquanto *B. aryabhatai* demonstrou maior tolerância. De modo geral, o aumento do tempo de exposição elevou os valores de tolerância ao As, sugerindo a ativação de mecanismos de defesa celular pelos microrganismos. No entanto, para *B. aryabhatai*, a tolerância diminuiu após 24 h de exposição; ainda assim, os valores permaneceram superiores aos observados para *A. brasilense* e *S. cerevisiae*. Os mecanismos de tolerância podem envolver respostas não específicas, predominantemente fisiológicas, como a ativação de sistemas de defesa contra o estresse oxidativo (EROs), a produção de antioxidantes, os ajustes metabólicos e os processos de reparo celular. Nesse contexto, a tolerância reflete a capacidade de cada microrganismo de integrar e modular essas respostas fisiológicas em função das doses de arsênio e do tempo de exposição (Figura 9). Em microrganismos eucarióticos, como *Saccharomyces cerevisiae*, essa tolerância pode ser adicionalmente favorecida pela compartimentalização celular, especialmente pelo sequestro vacuolar e pela detoxificação mediada por glutatona (Wysocki; Tamás, 2010).

Figura 9 - Mecanismos de tolerância não específicos em bactérias associados à especiação do arsênio no ambiente. Os mecanismos ilustrados (1–5) representam respostas fisiológicas gerais, incluindo a limitação da entrada, resposta ao estresse oxidativo, o sequestro intracelular, a formação de biofilme e os ajustes metabólicos.



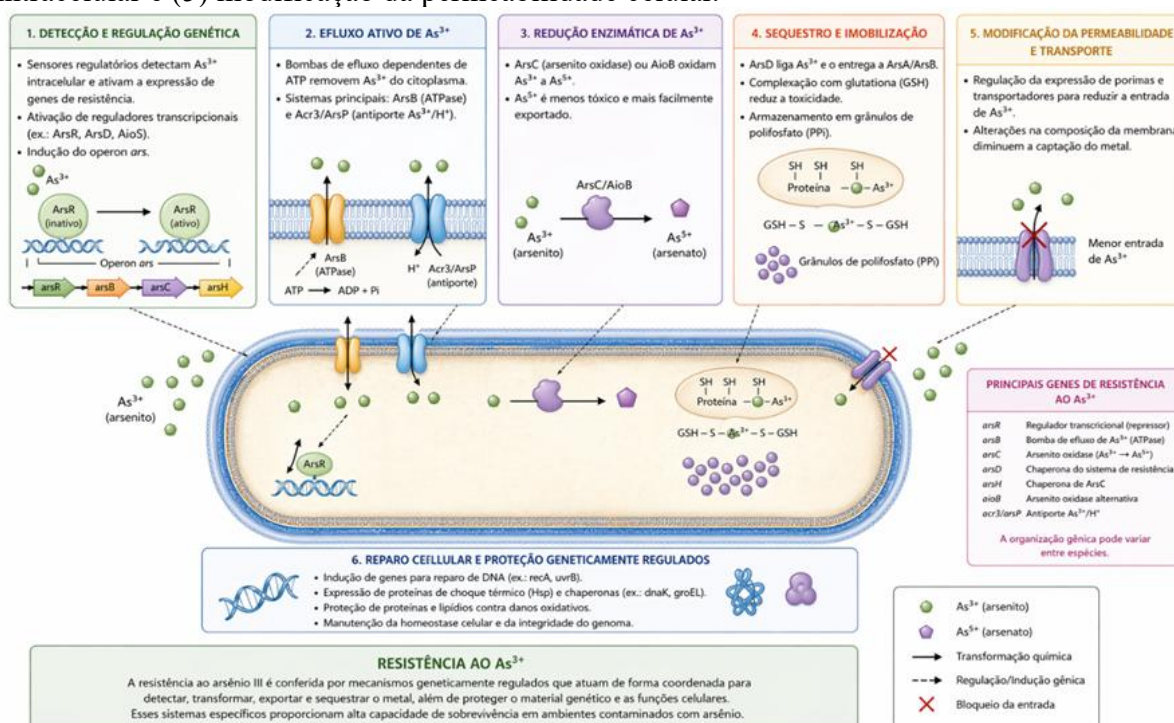
Fonte: Figura elaborada com auxílio do ChatGPT/OpenAI, com base em Kumar *et al.* (2022), Etesami, Jeong e Raheb (2023), Pavez *et al.* (2023) e William e Magpantay (2024).

Os resultados deste estudo mostram que os microrganismos apresentam distintos limites de toxicidade ao As^{3+} , evidenciados pelas diferenças entre as doses limiares de tolerância e de mortalidade. Entre os microrganismos avaliados, as menores diferenças foram observadas para *A. brasilense* e *B. japonicum*. Um aspecto importante é a maior sensibilidade de *B. japonicum* à toxicidade do As^{3+} com tolerância de $\leq 20,0 \text{ mg As L}^{-1}$ com mortalidade a partir de $> 22,2 \text{ mg As L}^{-1}$ em seu maior tempo de exposição, a qual pode estar relacionada ao seu crescimento mais lento em meio de cultura, exigindo maior tempo de exposição ao arsênio. *B. aryabhatai*, apresentou os maiores limites de tolerância e mortalidade, com tolerância de $\leq 78,7 \text{ mg As L}^{-1}$ e mortalidade a partir de $\geq 109,2 \text{ mg As L}^{-1}$ em 12 h.

Embora ainda sejam escassos os estudos que estabeleçam diretamente essas diferenças entre limites de tolerância e mortalidade para microrganismos expostos ao arsênio, esses resultados podem estar associados à capacidade intrínseca de cada espécie em responder aos danos celulares induzidos pelo As^{3+} . Nesse contexto, a variabilidade observada sugere que diferentes microrganismos apresentam distintos níveis de eficiência na ativação e integração de

mecanismos de defesa. Conforme ilustrado na Figura 10, além das respostas fisiológicas gerais, o crescimento dos microrganismos a exposição ao arsênio pode ser modulado pela indução de mecanismos de resistência geneticamente regulados, como a ativação do operon *ars*, que controla a expressão de genes envolvidos na detecção, transformação e remoção do As^{3+} , incluindo sistemas de efluxo (ex.: *ArsB*, *Acr3*), enzimas de transformação redox (ex.: *ArsC*) e processos de sequestro intracelular. Esses mecanismos atuam de forma coordenada para reduzir a toxicidade intracelular do arsênio, contribuindo para a manutenção da viabilidade celular sob condições de estresse (Kumar *et al.*, 2022; Etesami; Jeong; Raheb, 2023).

Figura 10 - Mecanismos genéticos de resistência ao arsênio em bactérias, envolvendo (1) detecção e regulação gênica, (2) efluxo ativo, (3) transformação química, (4) sequestro intracelular e (5) modificação da permeabilidade celular.



Fonte: Figura elaborada com auxílio do ChatGPT/OpenAI, com base em Kumar *et al.* (2022), Etesami, Jeong e Raheb (2023) e Ben Fekih *et al.* (2018).

Já para *S. cerevisiae*, mecanismos específicos de detoxificação, como o efluxo de As(III) e a compartimentalização vacuolar de complexos associados à glutatona, podem contribuir para reduzir o acúmulo e os efeitos tóxicos intracelulares do arsênio (Wysocki; Tamás, 2010). Entretanto, o As^{3+} pode entrar na célula por meio de aquagliceroporinas, como *Fps1*, e sua presença intracelular pode comprometer componentes e processos celulares, contribuindo para os efeitos tóxicos observados sob exposição ao contaminante (Wysocki; Tamás, 2010).

Os efeitos do arsenito variaram em função do microrganismo e do tempo de incubação, não sendo observado um padrão único de aumento da toxicidade com o prolongamento da

exposição. Essas diferenças podem estar relacionadas às distintas respostas celulares e aos mecanismos de resistência dos microrganismos diante da exposição ao contaminante. A literatura indica que o As^{3+} apresenta elevada afinidade por grupos tiol de proteínas e pode estar associado à geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), com consequentes alterações em componentes celulares (Kumar *et al.*, 2022). Entretanto, esses mecanismos não foram avaliados diretamente no presente estudo e constituem possíveis explicações para os padrões observados. De forma geral, nas condições experimentais avaliadas, o As^{3+} apresentou maior efeito tóxico sobre os microrganismos em comparação ao As^{5+} , evidenciando a importância da especiação química na determinação da toxicidade do arsênio.

5.4 Toxicidade do cromo para os microrganismos

Em comparação ao arsênio, o cromo apresentou toxicidade mais elevada para os microrganismos avaliados, promovendo inibição acentuada do crescimento mesmo em baixas concentrações. Esse comportamento contrasta com o padrão observado para o arsenato e o arsenito, em relação aos quais a resposta microbiana variou de acordo com a forma química e o tempo de exposição. A elevada toxicidade do cromo hexavalente está associada, principalmente, ao seu alto potencial oxidativo, podendo induzir a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e alterações relacionadas ao estresse oxidativo (Mushtaq *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2022; Al-Huqail *et al.*, 2025). Após sua entrada na célula, processos associados à redução intracelular do Cr(VI) também podem contribuir para a formação de espécies reativas e danos a componentes celulares (Halliwell; Gutteridge, 2015).

Enquanto o arsênio apresenta mecanismos de toxicidade distintos e dependentes da especiação, permitindo diferentes níveis de resposta e tolerância microbiana, o cromo, nas condições avaliadas neste estudo, apresentou efeitos mais acentuados sobre os microrganismos, o que contribuiu para a ausência de zonas bem definidas de tolerância e toxicidade em alguns casos. A elevada toxicidade do Cr e a capacidade de microrganismos resistentes de responderem à presença desse contaminante também têm sido relatadas em estudos envolvendo PGPR em ambientes contaminados (Mushtaq *et al.*, 2022; Sarwar *et al.*, 2023; Latif; Batool; Mafi, 2026). O uso do cromo como elemento comparativo permitiu evidenciar que a resposta microbiana é altamente dependente do tipo de contaminante, reforçando que o arsênio, especialmente em suas diferentes formas químicas, apresenta um comportamento fortemente dependente da especiação, quando comparado ao Cr(VI) , que apresentou efeitos mais severos nas condições experimentais avaliadas.

5.5 Mortalidade funcional de microrganismos sob exposição a altas doses de metais

Os resultados de mortalidade celular evidenciam que a resposta dos microrganismos ao arsênio é dependente da espécie e do tempo de exposição, revelando diferenças marcantes na capacidade de recuperação do crescimento entre os microrganismos avaliados. A recuperação do crescimento celular após a exposição a altas doses dos contaminantes indica que, mesmo sob condições adversas, a morte celular não ocorre de forma imediata ou total, e parte da população microbiana permanece íntegra e com capacidade de restabelecer seu crescimento quando transferida para condições favoráveis em meio de cultura.

Nesse contexto, *A. brasilense* e *B. japonicum* demonstraram elevada sensibilidade em determinadas concentrações e tempos avaliados. *B. aryabhatai* apresentou resposta variável, sugerindo ajustes fisiológicos frente ao estresse, e *S. cerevisiae* exibiu comportamento dinâmico, com redução da mortalidade em determinados períodos, possivelmente em decorrência da recuperação do crescimento celular.

Além disso, observou-se que, mesmo em condições de baixa densidade óptica, houve crescimento em placas, indicando que a exposição ao arsênio não promoveu a morte imediata de toda a população, mas que parte das células permaneceu viável, apesar da redução do crescimento observada por densidade óptica. Esse resultado evidencia que a redução da densidade óptica não representa necessariamente a ausência de células viáveis, reforçando a importância da avaliação conjunta do crescimento e da viabilidade celular.

Nesse cenário, a presença de metais no ambiente pode afetar não apenas a sobrevivência, mas também a funcionalidade dos microrganismos, uma vez que esses elementos interferem em processos metabólicos essenciais, como atividade enzimática, produção de energia e equilíbrio redox (Kumar *et al.*, 2022; Etesami *et al.*, 2023). Assim, quando bioinsumos microbianos são aplicados em solos contaminados, a exposição aos contaminantes pode comprometer tanto a sobrevivência dos microrganismos quanto a manutenção de características relacionadas à promoção do crescimento vegetal (Kumar *et al.*, 2022; Etesami *et al.*, 2023). A manutenção dessas características é particularmente importante para a utilização de inoculantes microbianos na agricultura, uma vez que sua eficiência depende da sobrevivência e da atividade funcional dos microrganismos após a aplicação (Diaz-Rodriguez *et al.*, 2025).

5.6 Cenário de toxicidade do arsênio sobre bioinsumos microbianos

De forma integrada, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a toxicidade dos metais avaliados sobre microrganismos de interesse agrícola é fortemente dependente da

forma química do contaminante, da espécie microbiana e do tempo de exposição. O arsênio apresentou comportamento variável, com o arsenato exercendo efeito mais brando e o arsenito demonstrando maior toxicidade, evidenciando a importância da especiação química na determinação da resposta biológica (Kumar *et al.*, 2022; Etesami *et al.*, 2023). Esse padrão é consistente com evidências de que a transformação microbiana entre As^{5+} e As^{3+} constitui um dos principais fatores que controlam a toxicidade e a disponibilidade do arsênio em sistemas ambientais (Kumar *et al.*, 2022; Etesami *et al.*, 2023).

Em contraste, o cromo apresentou elevada toxicidade, atuando de forma mais direta sobre a viabilidade celular, principalmente em função de seu alto potencial oxidativo e da indução de espécies reativas de oxigênio (Mushtaq *et al.*, 2022; Sharma *et al.*, 2022; Al-Huqail *et al.*, 2025). Além disso, foram observadas diferenças entre os microrganismos, com maior sensibilidade de *B. japonicum*, resposta intermediária de *A. brasilense* e *B. aryabhatai* e maior tolerância relativa de *S. cerevisiae*. Essas diferenças podem estar relacionadas aos diferentes mecanismos de resistência e adaptação ao estresse provocado por elementos potencialmente tóxicos, incluindo sistemas de detoxificação, processos de transformação química e mecanismos de resistência celular (Kumar *et al.*, 2022; Etesami *et al.*, 2023; Mushtaq *et al.*, 2022).

A análise conjunta da densidade óptica e da mortalidade celular evidenciou que a exposição aos metais pode não resultar em morte imediata, mas comprometer significativamente a atividade metabólica e o crescimento microbiano, caracterizando efeitos subletais amplamente descritos na literatura (Wysocki; Tamás, 2010). Nesse contexto, destaca-se que a viabilidade celular não está necessariamente associada à manutenção da funcionalidade, uma vez que microrganismos expostos a metais podem permanecer viáveis, porém incapazes de desempenhar funções biológicas essenciais.

Dessa forma, os resultados reforçam a importância de considerar não apenas a sobrevivência, mas também a resposta fisiológica e a manutenção das características funcionais dos microrganismos na avaliação do impacto de contaminantes, especialmente em sistemas agrícolas. A tolerância a elementos potencialmente tóxicos e a manutenção de características relacionadas à promoção do crescimento vegetal são aspectos relevantes para a seleção de microrganismos destinados à aplicação em ambientes contaminados (Kumar *et al.*, 2022; Etesami *et al.*, 2023). Além disso, a eficiência de inoculantes microbianos na agricultura depende da capacidade dos microrganismos de sobreviver, estabelecer-se e manter suas funções após a aplicação (Diaz-Rodriguez *et al.*, 2025).

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a resposta microbiana à contaminação por elementos potencialmente tóxicos é condicionada principalmente pela forma química do contaminante, pelo tempo de exposição e pelas características biológicas de cada microrganismo. No caso do arsênio, demonstrou-se que, nas condições experimentais avaliadas, o arsenito apresentou maior efeito tóxico do que o arsenato, confirmando a importância da especiação química na determinação dos efeitos biológicos. Entre os microrganismos avaliados, *Bradyrhizobium japonicum* apresentou elevada sensibilidade ao arsenito, enquanto *Azospirillum brasilense*, *Bacillus aryabhattai* e *Saccharomyces cerevisiae* apresentaram respostas variáveis em função da concentração e do tempo de exposição. O cromo, utilizado como elemento comparativo, apresentou efeitos tóxicos mais acentuados em diferentes condições experimentais. Além disso, o estudo demonstrou que a redução do crescimento, evidenciada pela densidade óptica, não correspondeu necessariamente à perda completa da viabilidade celular, uma vez que houve recuperação de células em meio sólido após a exposição aos contaminantes. Assim, este trabalho contribui para a compreensão dos efeitos do arsênio sobre microrganismos de interesse agrícola. Além disso, evidencia que a tolerância aos contaminantes constitui um aspecto relevante na seleção de microrganismos destinados ao uso como bioinsumos em ambientes potencialmente contaminados.

REFERÊNCIAS

- AKOIJAM, N.; JOSHI, S. R. Evaluation of arsenic-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria from Manipur for mitigating arsenic translocation and enhancing growth in rice (*Oryza sativa*). **Scientific Reports**, v. 16, art. 776, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30386-7>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-30386-7>. Acesso em: 4 mar. 2026.
- AL-HUQAIL, A. A. *et al.* Mitigating chromium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) via PGPR: insights into rhizosphere microbiome, antioxidants, and oxidative stress responses. **Plant Growth Regulation**, v. 105, p. 2085–2104, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10725-025-01390-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10725-025-01390-8>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- ALVES, J. R. F. **Avaliação do potencial de promoção de crescimento vegetal de bactérias do solo tolerantes à arsênio**. 2024. 73 f. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/6905>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- BEN FEKIH, I. *et al.* Distribution of arsenic resistance genes in prokaryotes. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, art. 2473, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02473>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2018.02473/full>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- BHATTACHARJEE, H. *et al.* Aquaglyceroporins: ancient channels for metalloids. **Journal of Biology**, v. 7, n. 9, art. 33, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1186/jbiol91>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/jbiol91>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- CHEN, J.; ROSEN, B. P. The arsenic methylation cycle: how microbial communities adapted methylarsenicals for use as weapons in the continuing war for dominance. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, art. 43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00043>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2020.00043/full>. Acesso em: 10 jan. 2026.
- DIAZ-RODRIGUEZ, A. M. *et al.* Microbial inoculants in sustainable agriculture: advancements, challenges, and future directions. **Plants**, v. 14, n. 2, art. 191, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14020191>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/2/191>. Acesso em: 17 fev. 2026.
- ETESAMI, H.; JEONG, B. R.; RAHEB, A. Arsenic (As) resistant bacteria with multiple plant growth-promoting traits: potential to alleviate As toxicity and accumulation in rice. **Microbiological Research**, v. 272, art. 127391, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127391>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501323000939?via%3Dihub>. Acesso em: 2 abr. 2026.
- GADD, G. M. Metals, minerals and microbes: geomicrobiology and bioremediation. **Microbiology**, London, v. 156, p. 609–643, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>. Disponível em: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.037143-0>. Acesso em: 2 abr. 2026.

GARBINSKI, L. D.; ROSEN, B. P.; CHEN, J. Pathways of arsenic uptake and efflux. **Environment International**, v. 126, p. 585–597, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.058>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412018326588>. Acesso em: 10 jan. 2026.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J. M. C. **Free radicals in biology and medicine**. 5. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=3DlKCgAAQBAJ>. Acesso em: 21 fev. 2026.

JALAL, F. *et al.* Biochar and plant growth-promoting rhizobacteria: a promising combination enhancing wheat (*Triticum aestivum* L.) growth under chromium stress. **Rhizosphere**, v. 36, art. 101167, 2025. ISSN 2452-2198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101167>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452219825001521>. Acesso em: 26 mar. 2026.

KUMAR, S. *et al.* Leveraging arsenic resistant plant growth promoting rhizobacteria for arsenic abatement in crops. **Journal of Hazardous Materials**, v. 425, art. 127965, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127965>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389421029344?via%3Dihub>. Acesso em: 5 abr. 2026.

LATIF, T.; BATOOL, A.; MAFI, A. Mitigating the chromium toxicity in *Zea mays* L. using Cr-resistant PGPR. **Trends in Animal and Plant Sciences**, v. 7, p. 107–115, 2026. DOI: <https://doi.org/10.62324/TAPS/2026.012>. Disponível em: <https://trendsaps.com/articles/7-0-v7-107-115.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2026.

LIU, T. *et al.* Anammox dominated As(V/III) speciation during long-term anaerobic conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 214, art. 110065, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.110065>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071725003591>. Acesso em: 20 jan. 2026.

LUSTOSA, E. A. *et al.* Toxicidade de inseticida agrícola em bioensaio com *Artemia salina*. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 19, n. 5, 2023. DOI: 10.14808/sci.plena.2023.055201. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/6858>. Acesso em: 6 mar. 2026.

MACIASZCZYK-DZIUBINSKA, E.; WAWRZYCKA, D.; WYSOCKI, R. Arsenic and antimony transporters in eukaryotes. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 13, n. 3, p. 3527–3548, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms13033527>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/13/3/3527>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MUSHTAQ, Z. *et al.* Potential of plant growth promoting rhizobacteria to mitigate chromium contamination. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, art. 102826, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102826>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422002863>. Acesso em: 17 mar. 2026.

PAVEZ, V. B. *et al.* Characterization of biofilm formation by *Exiguobacterium* strains in response to arsenic exposure. **Microbiology Spectrum**, v. 11, art. e02657-23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.02657-23>. Disponível em: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/spectrum.02657-23>. Acesso em: 20 jan. 2026.

RAMOS, B. de S. **Avaliação da dispersão de arsênio por poços contaminados no norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense

Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2019. Disponível em: <https://ppgern.uenf.br/publicacoes/dissertacoes/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

RENER, C. N. S. *et al.* Characterization of the chemical element arsenic and bioremediation of contaminated soils. **Diversitas Journal**, [S. l.], v. 7, n. 2, 2022. DOI: 10.48017/dj.v7i2.2017. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2017. Acesso em: 6 abr. 2026.

RITZ, C.; BATY, F.; STREIBIG, J. C.; GERHARD, D. Dose-response analysis using R. **PLOS ONE**, v. 10, n. 12, art. e0146021, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146021>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0146021>. Acesso em: 10 mar. 2026.

SARWAR, M. J. *et al.* Interaction of chromium (Cr) resistant plant growth promoting rhizobacteria with compost to phytostabilize Cr in spinach rhizosphere. **Plant Stress**, v. 10, art. 100261, 2023. ISSN 2667-064X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100261>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667064X23001288>. Acesso em: 22 mar. 2026.

SHARMA, P. *et al.* Amelioration of chromium-induced oxidative stress by combined treatment of selected plant-growth-promoting rhizobacteria and earthworms via modulating the expression of genes related to reactive oxygen species metabolism in *Brassica juncea*. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, art. 802512, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.802512>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35464947/>. Acesso em: 17 mar. 2026.

SILVA, R. S. *et al.* Plant growth-promoting rhizobacteria effect on maize growth and microbial biomass in a chromium-contaminated soil. **Bragantia**, v. 80, art. e2521, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200492>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/BmJLryJYy75FDd4gjpgdPYth/?format=html&lang=en>. Acesso em: 2 abr. 2026.

SOBAHAN, M. A. *et al.* Bioaugmentation with plant growth-promoting rhizobacteria alleviates chromium and salt stress in rice through the improvement of physiology, ion homeostasis, and antioxidant defense. **Microorganisms**, v. 13, n. 7, art. 1462, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13071462>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/13/7/1462>. Acesso em: 26 mar. 2026.

TANAKA, Y.-K.; MATSUHASHI, K.; OGRA, Y. Analytical techniques for arsenic speciation. **Analytical Sciences**, v. 41, n. 4, p. 317–321, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44211-025-00722-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44211-025-00722-y>. Acesso em: 21 abr. 2026.

VINCENT, J. M. **A manual for the practical study of root-nodule bacteria**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1970. 164 p. (International Biological Programme Handbook, n. 15).

WILLIAM, V. U.; MAGPANTAY, H. D. Arsenic and microorganisms: genes, molecular mechanisms, and recent advances in microbial arsenic bioremediation. **Microorganisms**, v. 12, n. 1, art. 74, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12010074>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/12/1/74>. Acesso em: 20 mar. 2026.

WYSOCKI, R.; TAMÁS, M. J. How *Saccharomyces cerevisiae* copes with toxic metals and metalloids. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 34, n. 6, p. 925–951, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00217.x>. Disponível em: <https://academic.oup.com/femsre/article/34/6/925/593039>. Acesso em: 10 jan. 2026.

YANG, Y.; WU, S.; LILLEY, R. M.; ZHANG, R. The diversity of membrane transporters encoded in bacterial arsenic-resistance operons. **PeerJ**, v. 3, art. e943, 2015. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.943>. Disponível em: <https://peerj.com/articles/943/>. Acesso em: 10 jan. 2026.