

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

THALIA SILVA VALÉRIO

**ASSOCIAÇÃO DE *Sorghum bicolor* E BIOFERTILIZANTE NA ATENUAÇÃO DOS
EFEITOS NEGATIVOS DO TEBUTHIURON NO SOLO**

Ilha Solteira
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

THALIA SILVA VALÉRIO

ASSOCIAÇÃO DE *Sorghum bicolor* E BIOFERTILIZANTE NA ATENUAÇÃO DOS EFEITOS NEGATIVOS DO TEBUTHIURON NO SOLO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre na Especialidade em Manejo e Conservação do Solo e da Água

Paulo Renato Matos Lopes
Orientador

Ilha Solteira
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V164a Valério, Thalia Silva.
Associação de *Sorghum bicolor* e biofertilizante na atenuação dos efeitos negativos do Tebuthiuron no solo / Thalia Silva Valério. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
61 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistema de produção, manejo de conservação do solo e da água, 2026

Orientador: Paulo Renato Matos Lopes

Inclui bibliografia

1. Bioinsumo. 2. Ecotoxicidade. 3. Herbicida. 4. Inseticida. 5. Resíduos de pesticidas. 6. Sorgo.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa contribui para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo do solo, demonstrando o potencial do *Sorghum bicolor* associado a biofertilizante na atenuação dos efeitos negativos e recuperação de solos com resíduos dos pesticidas tebuthiuron e thiamethoxam. Seus resultados subsidiam práticas agrícolas mais seguras, com redução do risco ecotoxicológico e melhoria da qualidade ambiental do solo.

Potential impact of this research

This research contributes to the development of sustainable soil management strategies by demonstrating the potential of *Sorghum bicolor* associated with biofertilizer to attenuate of negative effects and remediate of soils with pesticide residues from tebuthiuron and thiamethoxam. Results support safer agricultural practices, reducing ecotoxicological risk and improving soil environmental quality.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ASSOCIAÇÃO DE Sorghum bicolor E BIOFERTILIZANTE NA ATENUAÇÃO DOS EFEITOS NEGATIVOS DO TEBUTHIURON NO SOLO


AUTORA: THALIA SILVA VALÉRIO

ORIENTADOR: PAULO RENATO MATOS LOPES


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

 Documento assinado digitalmente
PAULO RENATO MATOS LOPES
Data: 20/02/2026 16:36:04-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. PAULO RENATO MATOS LOPES (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / UNESP / Câmpus de Dracena - FCAT

 Documento assinado digitalmente
ENRICO MENDES SAGGIORO
Data: 20/02/2026 15:56:09-0360
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ENRICO MENDES SAGGIORO (Participação Virtual)
Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca / Fundação Oswaldo Cruz - Fiocruz

 Documento assinado digitalmente
CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI
Data: 20/02/2026 16:33:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / UNESP / Câmpus de Dracena - FCAT

Ilha Solteira, 20 de fevereiro de 2026.

DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico este trabalho a Deus, pois entreguei tudo aos Seus cuidados e, em cada Etapa, vi o cuidado minucioso d'Ele.

Dedico também este trabalho ao meu pai, que, mesmo não tendo concluído o ensino fundamental, sempre fez de tudo para me oferecer a melhor educação, sendo o melhor pai de menina do mundo.

À minha mãe, que é a pessoa que mais torce pelo meu sucesso, mulher forte e incrível, cujas palavras jamais seriam suficientes para descrever tudo o que representa para mim e por quem espero, a cada dia, dar ainda mais orgulho.

Por fim, dedico este trabalho à minha irmã mais nova, minha melhor amiga desde o momento em que recebi a notícia de seu nascimento. Desde então, algo em meu coração dizia que eu sempre teria alguém no mundo por mim, com quem compartilho um senso de humor tão afinado quanto o nosso.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Processo 2024/14808-4.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Paulo Lopes, por todo o ensinamento, pelas valiosas orientações e pela constante disponibilidade. Sua atuação vai além da vida acadêmica, sendo um exemplo de organização, ética e compromisso na orientação. Não poderia ter feito escolha melhor: desde a graduação até o mestrado e, futuramente, no doutorado, tem sido um grande exemplo, sempre presente e contribuindo de forma fundamental em cada Etapa desta trajetória.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da Universidade Estadual Paulista (FCAT/UNESP), campus de Dracena, por toda a estrutura e apoio disponibilizados para a condução dos experimentos.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA) da UNESP, campus de Ilha Solteira - FEIS, por todo o apoio institucional e atenção ao longo do mestrado e na continuidade da formação no doutorado.

A todos os participantes do GAIA (Grupo de Ação em Impactos Ambientais) da FCAT/UNESP pela parceria, dedicação e trabalho em equipe.

À empresa AMTec BioAgrícola®, pela parceria estabelecida ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À empresa BRSeeds®, pelas doações de sementes.

Ao grupo NETA (FCAT/UNESP), liderado pelo Prof. Evandro Pereira Prado, e todos os seus membros pelo auxílio na Etapa de aplicação dos tratamentos.

Aos técnicos da UNESP - FCAT, pelo suporte e auxílio em todas as Etapas de condução do experimento.

Agradeço à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido inicialmente por meio da bolsa de mestrado.

À Fundação Agrisus, pelo auxílio financeiro concedido ao projeto aprovado (Processo PA 4158-25).

Agradeço aos membros da banca do Exame Geral de Qualificação, Prof. Leandro Tropaldi e Prof. Ronaldo da Silva Viana, pelos valiosos comentários, contribuições e ensinamentos que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste trabalho.

Aos professores da banca de defesa Profa. Carolina dos Santos Batista Bonini e Prof. Enrico Mendes Saggioro, por aceitarem esse convite tão especial, que marca a conclusão desta Etapa de formação e a oportunidade de compartilhamento de conhecimentos.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização dos experimentos, em especial Ana Paula, Eloá, Isadora, Ana Carolina e demais colaboradores. Também agradeço à minha amiga Nathalia Ribeiro por todas as conversas e pelo apoio constante, mesmo à distância, sempre torcendo uma pela outra, ainda que conectadas virtualmente.

“Devagar, você está indo bem.
Você não pode ser tudo o que quer ser.
Quero que você esteja à frente do seu tempo.”

- Billy Joel, Viena

RESUMO

A intensificação do uso de pesticidas em sistemas agrícolas tropicais tem ampliado a ocorrência de resíduos persistentes no solo, com potenciais efeitos fitotóxicos e ecotoxicológicos. O tebuthiuron e o thiamethoxam destacam-se pela elevada persistência, mobilidade e risco ambiental, demandando estratégias integradas de mitigação. Este estudo avaliou o potencial de *Sorghum bicolor* associado à aplicação de biofertilizante na atenuação dos efeitos residuais desses compostos em Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa. Na Etapa I, cinco cultivares (BRS Ponta Negra, Catisorgo, Precious AL, SHS 560 e IAC Santa Elisa) foram submetidas à presença de tebuthiuron a partir de subdose simulando contaminação residual. Assim, foram avaliadas altura da planta, comprimento radicular, índice de clorofila foliar e biomassa seca aos 70 dias após a semeadura (DAS). A cultivar SHS 560 apresentou maior tolerância, com menores reduções relativas de biomassa aérea e radicular, sendo escolhida para um novo experimento com associações de pesticidas e bioinsumos. Na Etapa II, em delineamento fatorial envolvendo tebuthiuron, thiamethoxam e biofertilizante, o desenvolvimento vegetal foi monitorado aos 20, 30, 40, 50, 60 e 70 DAS. A associação com biofertilizante promoveu incrementos consistentes de altura e biomassa seca, mesmo sob presença combinada dos pesticidas. Bioensaios ecotoxicológicos com *Lactuca sativa* indicaram aumento progressivo do índice de germinação ao longo do ciclo, evidenciando redução do potencial fitotóxico do solo. O fator temporal mostrou-se predominante nos resultados, uma vez que o avanço do cultivo do sorgo esteve diretamente associado à diminuição do potencial ecotoxicológico do herbicida no solo. Assim, a interação solo-planta-tempo foi determinante para a atenuação dos efeitos residuais, destacando também o biofertilizante como um potencial aliado no processo de recuperação de áreas com histórico de contaminação por pesticidas.

Palavras-chave: bioinsumo; ecotoxicidade; herbicida; inseticida; resíduos de pesticidas; sorgo.

ABSTRACT

The intensification of pesticide use in tropical agricultural systems has increased the occurrence of persistent soil residues with potential phytotoxic and ecotoxicological effects. Tebuthiuron and thiamethoxam are characterized by high persistence, mobility, and environmental risk, requiring integrated mitigation strategies. This study evaluated the potential of *Sorghum bicolor* associated with biofertilizer application to attenuate residual effects of these compounds in a sandy Oxisol. In Stage I, five cultivars (BRS Ponta Negra, Catisorgo, Precious AL, SHS 560 and IAC Santa Elisa) were exposed to tebuthiuron at a subdose simulating residual contamination, and plant height, root length, chlorophyll index, and dry biomass were assessed at 70 days after sowing (DAS). SHS 560 exhibited greater tolerance, with lower relative reductions in shoot and root dry biomass, which was chosen to a new experiment with pesticides and bioinputs association. In Stage II, under a factorial design including tebuthiuron, thiamethoxam, and biofertilizer, plant development was monitored at 20, 30, 40, 50, 60, and 70 DAS. Biofertilizer application promoted consistent increases in plant height and dry biomass, even under combined pesticide presence. Bioassays using *Lactuca sativa* demonstrated a progressive increase in germination index throughout cultivation, indicating reduced soil phytotoxicity over time. The temporal factor was predominant in determining the results, as the progression of sorghum cultivation was directly associated with the decrease in herbicide ecotoxicological potential in the soil. Therefore, soil-plant-time interactions played a central role in residual effect attenuation, and biofertilizer application may also act as a supportive strategy in the recovery of pesticide-affected soils.

Keywords: bioinput; ecotoxicity; herbicide; insecticide; pesticide residues; sorghum.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Fluxograma das Etapas experimentais e parâmetros avaliados. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 2 – Solo coletado e peneirado – FCAT/UNESP. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 3 – Aplicação dos pesticidas a partir do pulverizador laboratorial automático.
..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 4 – Herbicida tebuthiuron (Combine® 500 SC) e inseticida thiamethoxam (Actara® 750 SG)..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 5 – Biofertilizante fornecido pela empresa AMTec Bioagrícola®.30
- Figura 6 – Adição do biofertilizante nos vasos. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7 – Semeadura do *S. bicolor* nas unidades experimentais.31
- Figura 8 – Plantas de *S. bicolor* antes do desbaste em 10 DAS.32
- Figura 9 – Amostra vegetal após realizado o desbaste em 10 DAS. .. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 10 – Amostras sendo preparadas para a secagem em estufa para determinação da biomassa seca..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 11 – Materiais para o preparo do solubilizado das amostras de solo.....34
- Figura 12 – Solubilizado (extrato aquoso) pronto para uso nos bioensaios.35
- Figura 13 – Bioensaios de ecotoxicidade com sementes de *Lactuca sativa* a serem incubados.....35
- Figura 14 – Índice de germinação das plântulas de alface nos bioensaios de ecotoxicidade nos tempos inicial (0 DAS) e final (70 DAS) para as diferentes amostras de solo a partir do cultivar de SHS 60. **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização físico-química do solo utilizado no experimento.	25
Tabela 2 – Altura da planta (H), comprimento das raízes (RL) e índice de clorofila foliar (LCI) das cultivares de sorgo em 70 DAS.....	39
Tabela 3 – Biomassa seca da parte aérea (SDB) e das raízes (RDB) das cultivares de sorgo em 70 DAS.	40
Tabela 4 – Altura de plantas (cm) da cultivar de sorgo SHS 560 em relação ao tempo de desenvolvimento e às amostras de solo	42
Tabela 5 – Biomassa seca da parte aérea (SDB) (g) da cultivar de sorgo SHS 560 em relação à média geral dos tempos de desenvolvimento e às amostras de solo.....	44
Tabela 6 – Biomassa seca das raízes (RDB) (g) da cultivar de sorgo SHS 560 em relação ao tempo de desenvolvimento e às amostras de solo	46

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BIOF	Biofertilizante
CN	Controle negativo
DAS	Dias após a semeadura
EMA	Estação Meteorológica Automática
GI	Índice de germinação
H	Altura da planta
i.a.	Ingrediente ativo
LCI	Índice de clorofila foliar
RDB	Biomassa seca das raízes
RL	Comprimento das raízes
SDB	Biomassa seca da parte aérea
TBT	Herbicida tebuthiuron
TMX	Inseticida thiamethoxam

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. GERAL	17
2.2. ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1. INTENSIFICAÇÃO AGRÍCOLA E EXPOSIÇÃO AMBIENTAL A PESTICIDAS	18
3.2. PLANTAS NA ATENUAÇÃO DOS PREJUÍZOS DE RESÍDUOS DE PESTICIDAS NO SOLO	19
3.3. BIOENSAIOS DE ECOTOXICIDADE EM SOLOS AGRÍCOLAS	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1. ETAPA I	24
4.1.1. Solo e pesticida	24
4.1.2. Seleção da cultivar de sorgo	26
4.1.3. Preparo das unidades experimentais	27
4.1.4. Período de condução e avaliação do desenvolvimento vegetal	27
4.1.5. Análise estatística de dados.....	28
4.2. ETAPA II	28
4.2.1. Solo, pesticidas, biofertilizante	28
4.2.2. Desenvolvimento do sorgo em solo com tebuthiuron, thiamethoxam e/ou biofertilizante	30
4.2.3. Preparo das unidades experimentais	30
4.2.4. Período de condução e avaliação do desenvolvimento vegetal	31
4.2.5. Bioensaios de ecotoxicidade.....	33
4.2.6. Determinação de concentração residual do tebuthiuron e thiamethoxam	36
4.2.7. Análise estatística de dados.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38

5.1. ETAPA I - SELEÇÃO DA CULTIVAR DE SORGO	38
5.2. ETAPA II – DESENVOLVIMENTO DO SORGO EM SOLO COM TEBUTHIURON, THIAMETHOXAM E/OU BIOFERTILIZANTE	41
5.2.1. Bioensaios de ecotoxicidade.....	48
6. CONCLUSÃO.....	50
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

Segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2026), a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na safra atual é estimada em 666.445,3 mil toneladas, cultivadas em aproximadamente 8.974,6 mil hectares, evidenciando a expressiva relevância dessa cultura em extensas áreas agrícolas e sua importância econômica para a produção de açúcar e biocombustíveis (Huang *et al.*, 2020). Para a manutenção de elevados níveis de produtividade, o sistema de cultivo da cana-de-açúcar depende do uso recorrente de pesticidas, especialmente herbicidas e inseticidas, empregados no manejo de plantas daninhas e pragas, conforme amplamente discutido na literatura (Bassey *et al.*, 2021; Brasil, 2026).

O consumo global de pesticidas ultrapassa 2,6 milhões de toneladas por ano, sendo cerca de 50% desse total composto por herbicidas (Tygel *et al.*, 2024). Dentre esses, o tebuthiuron destaca-se por ser aplicado diretamente ao solo e apresentar alto potencial de lixiviação (Madeira *et al.*, 2023), além de elevada resistência à degradação (Oliveira *et al.*, 2023). Em função de seu prolongado período residual e de seu modo de ação, esse herbicida é classificado como de alto risco ambiental (Thomas *et al.*, 2020), sendo inclusive categorizado como substância altamente tóxica pela União Europeia (ECHA, 2021).

Como inseticida neonicotinóide sistêmico, o thiamethoxam é amplamente utilizado para o controle de pragas e para o aumento do vigor das plantas (Silva, *et al.*, 2025). Contudo, seu uso contínuo levanta preocupações ambientais, uma vez que apresenta persistência no solo por até 618 dias e elevada mobilidade, sendo classificado como ambientalmente perigoso (IBAMA, 2019).

A presença de resíduos de pesticidas e de seus subprodutos de degradação em solos agrícolas torna necessária a adoção de estratégias capazes de reduzir seus impactos negativos no agroecossistema. Nesse contexto, a utilização de culturas de sucessão tem sido apontada como uma alternativa eficaz, de baixo custo e ambientalmente adequada, contribuindo para a estabilização de contaminantes e para a recuperação da qualidade do solo (Yuan *et al.*, 2024). A escolha das espécies vegetais destinadas a esse processo deve considerar atributos como vigor, tolerância

à presença de compostos residuais, elevada produção de biomassa e rápido desenvolvimento (Ferreira *et al.*, 2024).

Estudos recentes demonstram que culturas como *Mucuna pruriens* e *Pennisetum glaucum* podem contribuir para a redução dos impactos residuais do tebutiuron no solo (Ferreira *et al.*, 2021), além de evidenciarem o potencial de *Sorghum bicolor* em mitigar os efeitos adversos desse herbicida (Conciani *et al.*, 2023). Paralelamente, a utilização de bioinsumos tem se mostrado uma estratégia promissora para atenuar os efeitos negativos de pesticidas em solos agrícolas, favorecendo a recuperação da qualidade do solo e estimulando processos biológicos benéficos ao ambiente edáfico (Maldonado *et al.*, 2022; Karishma *et al.*, 2024).

A ecotoxicologia constitui uma ferramenta fundamental para a avaliação dos efeitos de contaminantes ambientais sobre organismos-teste, permitindo a compreensão dos impactos diretos e indiretos desses compostos nos ecossistemas (Gouveia *et al.*, 2023). Em solos agrícolas, a alface (*Lactuca sativa*) é amplamente utilizada em bioensaios ecotoxicológicos devido à sua elevada sensibilidade a contaminantes, rápido desenvolvimento e baixo custo operacional (ISO, 2012; Zortéa *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2021; Nantes *et al.*, 2022; Frias *et al.*, 2023; Valério, 2023). Estudos indicam que a exposição dessa espécie a pesticidas pode resultar em inibição do crescimento e redução da biomassa, tornando-a uma ferramenta eficiente para a avaliação da qualidade ambiental de solos contaminados (Choudhary *et al.*, 2007).

Portanto, o presente trabalho está estruturado em três Etapas complementares. A primeira consiste em uma revisão de literatura, abordando os principais conceitos e fundamentos teóricos relacionados ao tema. A segunda Etapa corresponde a um estudo piloto, no qual foram avaliadas diferentes cultivares de *Sorghum bicolor*, com o objetivo de identificar aquela com melhor adaptação à presença do herbicida tebutiuron. Por fim, a terceira Etapa contempla a avaliação da cultivar com melhor desempenho, em associação ao inseticida thiamethoxam e ao biofertilizante, com ênfase na análise da redução do potencial ecotoxicológico do solo, por meio de bioensaios com *Lactuca sativa*.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Avaliar o potencial de uso de *Sorghum bicolor* no processo de recuperação de solo com resíduos de tebuthiuron e thiamethoxam, associado à aplicação de biofertilizante.

2.2. ESPECÍFICOS

- Analisar o desenvolvimento de cinco cultivares de *S. bicolor* cultivadas em solo com aplicação do herbicida tebuthiuron;
 - Determinar a influência do biofertilizante no desenvolvimento do *S. bicolor* e na atenuação dos efeitos negativos dos pesticidas no solo; e
 - Monitorar o potencial ecotoxicológico do solo ao longo do crescimento vegetal, evidenciando as consequências ambientais das diferentes condições experimentais.
-

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. INTENSIFICAÇÃO AGRÍCOLA E EXPOSIÇÃO AMBIENTAL A PESTICIDAS

O uso intensivo de pesticidas na agricultura contemporânea constitui uma problemática que demanda atenção crescente. De acordo com Tang *et al.* (2021), aproximadamente 64% das áreas agrícolas em escala global apresentam risco de contaminação por pesticidas, sendo que cerca de 31% dessas áreas são classificadas como de alto risco. Esses dados evidenciam a ampla disseminação desses compostos no ambiente agrícola e reforçam a relevância da temática no contexto da sustentabilidade ambiental.

Nesse sentido, a contaminação ambiental por pesticidas configura-se como um dos principais desafios da agricultura moderna, uma vez que pode desencadear efeitos adversos sobre os ecossistemas terrestres e aquáticos (Mendes *et al.*, 2021). A aplicação contínua e, em muitos casos, desordenada desses produtos para o controle de plantas daninhas, pragas e doenças agrícolas favorece a ocorrência de impactos negativos a longo prazo, sobretudo devido à persistência e à mobilidade dessas moléculas no ambiente, que podem afetar organismos não alvo (Wan *et al.*, 2025).

Embora os pesticidas desempenhem papel fundamental na promoção da eficiência produtiva da agricultura moderna, contribuindo para o controle de insetos-praga e patógenos e para o aumento da produtividade das culturas, seu uso acarreta, de forma inevitável, a contaminação dos solos agrícolas, a alteração dos ecossistemas e a geração de riscos à saúde humana (Ni *et al.*, 2025; Tang *et al.*, 2021; Yi *et al.*, 2024).

Apesar da ampla utilização desses compostos, a real magnitude da contaminação dos solos por resíduos de pesticidas ainda não é completamente conhecida. A maioria dos estudos disponíveis concentra-se em áreas agrícolas específicas, campos experimentais ou parcelas delimitadas, apresentando elevada variabilidade tanto na abrangência espacial quanto nos métodos empregados em campo e em laboratório (Sabzevari; Hofman, 2022). Essa heterogeneidade limita a avaliação consistente dos riscos associados aos pesticidas para os ecossistemas terrestres e aquáticos, bem como para a saúde humana, em escalas nacional, continental e global.

Adicionalmente, a integração dos dados provenientes de diferentes investigações representa um desafio significativo, uma vez que as concentrações de pesticidas no solo resultam de um sistema dinâmico de entradas e saídas. Esse sistema é influenciado pela quantidade e pelo número de compostos que atingem o solo, bem como pelas taxas de degradação, transformação e transporte para outros compartimentos ambientais. O destino ambiental dos pesticidas é regulado por processos físicos, químicos e biológicos, os quais são altamente sensíveis às condições regionais (Alekseeva *et al.*, 2014; Arias-Estévez *et al.*, 2008; Gentil *et al.*, 2019).

Entre os principais fatores que condicionam o comportamento e o destino dos pesticidas no solo destacam-se: (i) as propriedades do solo, como textura, permeabilidade, teor de matéria orgânica e pH; (ii) os atributos físico-químicos dos pesticidas, incluindo solubilidade em água, persistência e coeficiente de adsorção; (iii) as práticas de manejo agrícola adotadas, como método, dose e época de aplicação; e (iv) as condições ambientais locais, como profundidade do lençol freático, características geológicas e clima (Pérez-Lucas *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, considerando o uso recorrente de pesticidas e a existência de extensas áreas potencialmente contaminadas por esses compostos, torna-se imprescindível o desenvolvimento de estudos que investiguem estratégias voltadas à mitigação de seus impactos ambientais. Pesquisas que avaliem o uso de plantas, a aplicação de biofertilizantes e a realização de bioensaios de ecotoxicidade são fundamentais para a compreensão do comportamento desses contaminantes no solo e para a avaliação das condições ambientais associadas, contribuindo para o avanço de práticas agrícolas mais sustentáveis.

3.2. PLANTAS NA ATENUAÇÃO DOS PREJUÍZOS DE RESÍDUOS DE PESTICIDAS NO SOLO

A intensificação agrícola, a urbanização e a industrialização constituem fatores determinantes para o aumento da contaminação ambiental por metais pesados, compostos orgânicos, radionuclídeos e pesticidas (Möznér *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2016; Malik *et al.*, 2017). Diante desse cenário, diferentes estratégias vêm sendo propostas para promover a atenuação desses contaminantes, especialmente pesticidas, no ambiente.

Entre essas estratégias, destaca-se a fitorremediação, reconhecida como alternativa sustentável e de menor custo quando comparada aos métodos convencionais. Trata-se de uma abordagem economicamente viável e ambientalmente favorável para o tratamento de solos e águas contaminadas (Ashraf *et al.*, 2019), contribuindo para a atenuação de impactos ambientais.

Essa técnica baseia-se no uso de plantas para absorver, degradar, transformar ou estabilizar contaminantes no solo, incluindo pesticidas, sendo sua eficiência dependente da biodisponibilidade dos compostos e das interações entre planta, solo e microrganismos. A fitorremediação refere-se a uma tecnologia de restauração ecológica que utiliza principalmente plantas (Asante-Badu *et al.*, 2020).

O processo envolve diferentes tipos de plantas, como arbustos, árvores, vegetação aquática e gramíneas, associadas a seus microrganismos simbióticos, com o objetivo de remover, degradar ou imobilizar poluentes em áreas afetadas (Asante-Badu *et al.*, 2020).

Além disso, é considerada uma abordagem ambientalmente amigável, prática e economicamente viável, sendo eficiente no tratamento de águas subterrâneas, efluentes industriais e solos contaminados por pesticidas e outros poluentes (Liu *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2024).

Os principais mecanismos envolvidos na fitorremediação incluem: (1) fitoextração, (2) fitoestabilização ou fitoimobilização, (3) rizofiltração, (4) fitovolatilização, (5) fitodegradação e rizodegradação e (6) fitodessalinização (Kafle *et al.*, 2022). Esses processos contribuem de forma integrada para a atenuação de contaminantes no ambiente.

De acordo com Aryal *et al.* (2024), a fitorremediação apresenta potencial significativo na redução de metais pesados e compostos orgânicos, incluindo pesticidas. Cruz *et al.* (2026) destacam que famílias como Fabaceae e Poaceae se sobressaem devido à elevada produção de biomassa, rápido crescimento e sistemas radiculares desenvolvidos, além da capacidade de estimular a atividade microbiana na rizosfera, favorecendo a rizodegradação e, conseqüentemente, a atenuação de pesticidas no solo.

Em estudo experimental, Conciani *et al.* (2023) avaliaram espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron. Os resultados indicaram que *Sorghum bicolor* e *Arachis hypogaea* apresentaram maior tolerância ao herbicida, evidenciando potencial para a atenuação da contaminação.

O amendoim promoveu redução de até 76% do contaminante ao final do ciclo, enquanto o sorgo reduziu aproximadamente 45%, demonstrando viabilidade para uso em sucessão ou rotação de culturas com o objetivo de mitigar efeitos residuais de pesticidas (Conciani *et al.*, 2023).

Apesar desses avanços, ainda são escassas as pesquisas que associam o sorgo ao uso de biofertilizantes como estratégia integrada para a atenuação de pesticidas. Essa lacuna reforça a relevância da presente dissertação para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis de manejo do solo (Conciani *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2026).

Diversos fatores físicos, químicos e biológicos podem influenciar a eficiência dos processos de fitorremediação (Kafle *et al.*, 2022). As plantas podem apresentar diferentes níveis de tolerância e capacidade de atenuação dependendo do tipo de pesticida aplicado (Anand *et al.*, 2019).

As características químicas do pesticida, como solubilidade em água, massa molecular e persistência ambiental, também exercem influência direta sobre sua fitorremediação e sobre os processos de atenuação no solo (Eevers *et al.*, 2017).

Adicionalmente, fatores ambientais como intensidade luminosa, temperatura e pH desempenham papel fundamental na dinâmica de degradação e na eficiência dos mecanismos de atenuação mediados por plantas e microrganismos (Zhang *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2021).

Assim, diversos fatores físicos, químicos e biológicos podem influenciar de maneira integrada a eficiência dos processos de fitorremediação e a atenuação de pesticidas no ambiente (Kafle *et al.*, 2022).

3.3. BIOENSAIOS DE ECOTOXICIDADE EM SOLOS AGRÍCOLAS

A intensificação do uso de pesticidas nos sistemas agrícolas modernos tem ampliado as preocupações relacionadas aos seus impactos sobre organismos não alvo e sobre o equilíbrio dos ecossistemas terrestres, especialmente em regiões tropicais. Nesse contexto, a ecotoxicologia destaca-se como uma área essencial para a compreensão dos efeitos ambientais desses compostos, uma vez que se dedica à avaliação das respostas biológicas decorrentes da exposição a contaminantes, considerando a interação entre o agente químico, o solo e os organismos vivos (Freitas *et al.*, 2026).

Os bioensaios ecotoxicológicos configuram-se como ferramentas amplamente utilizadas para a avaliação desses impactos, pois possibilitam a identificação de efeitos adversos que não são plenamente detectados por análises exclusivamente físico-químicas. Enquanto tais análises fornecem informações sobre a presença e a concentração dos contaminantes, os bioensaios permitem avaliar a biodisponibilidade efetiva das substâncias no ambiente e suas consequências biológicas, incluindo efeitos subletais e crônicos sobre os organismos expostos (Santos *et al.*, 2025).

De forma geral, os estudos em ecotoxicologia buscam analisar os efeitos tóxicos de compostos poluentes no ambiente, considerando tanto os impactos diretos quanto indiretos sobre os seres vivos. Para isso, organismos-teste são empregados em ensaios laboratoriais, nos quais são expostos a diferentes níveis de contaminação, possibilitando a determinação da toxicidade de amostras ambientais por meio da avaliação de respostas agudas e/ou crônicas (Magalhães; Ferrão Filho, 2008).

Os bioensaios de ecotoxicidade permitem identificar alterações comportamentais, fisiológicas e morfológicas, bem como efeitos letais, que variam de acordo com o tipo de substância química, o tempo e a concentração de exposição, a frequência do contato, o organismo-teste utilizado e a fase do seu ciclo de vida (Lima, 2017). Portanto, esses ensaios fornecem uma avaliação integrada dos riscos ambientais associados aos contaminantes.

A escolha de um bioindicador adequado para esses ensaios requer o conhecimento de aspectos como facilidade de manejo, ciclo de vida, sensibilidade aos contaminantes e custos operacionais, critérios fundamentais para a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados (Silva *et al.*, 2012). Diversos organismos podem ser utilizados como organismos-teste, incluindo ácaros, anelídeos, colêmbolos, diplópodes, isópodes e espécies vegetais, conforme relatado na literatura (Zortéa *et al.*, 2017).

Nesse contexto, a espécie *Lactuca sativa* (alface) tem sido amplamente empregada como bioindicadora em estudos ecotoxicológicos, em razão de suas características fisiológicas favoráveis e elevada sensibilidade à presença de pesticidas no solo. Gonçalves *et al.* (2016) utilizaram essa espécie como organismo-teste para avaliar os efeitos de contaminantes agrícolas, evidenciando sua vulnerabilidade à exposição a herbicidas. De maneira semelhante, Faria *et al.* (2019) realizaram ensaios ecotoxicológicos com sementes de *L. sativa*, associando

diferentes doses de tebuthiuron e vinhaça após processos de atenuação natural, demonstrando a aplicabilidade da espécie na avaliação da toxicidade residual do solo.

Em áreas submetidas ao uso frequente de insumos químicos, em função das exigências do manejo agrícola, torna-se necessária a adoção de estratégias voltadas à recuperação ambiental. Nesse sentido, os estudos ecotoxicológicos contribuem de forma significativa para a avaliação do potencial de técnicas de biorremediação em solos contaminados. Considerando que o herbicida tebuthiuron é amplamente utilizado no cultivo da cana-de-açúcar para o controle de plantas daninhas, é fundamental reconhecer os riscos ecotoxicológicos associados à sua persistência e toxicidade no ambiente.

De modo geral, a literatura reforça que os bioensaios ecotoxicológicos constituem ferramentas indispensáveis para a avaliação dos impactos de pesticidas no solo, especialmente quando associados a análises químicas e conduzidos em condições que representem adequadamente os ambientes tropicais. Essa abordagem integrada permite a identificação de riscos potenciais à biota edáfica e subsidia o desenvolvimento de estratégias mais eficazes para a avaliação e mitigação dos impactos ambientais decorrentes do uso de pesticidas (Santos *et al.*, 2025; Freitas *et al.*, 2026).

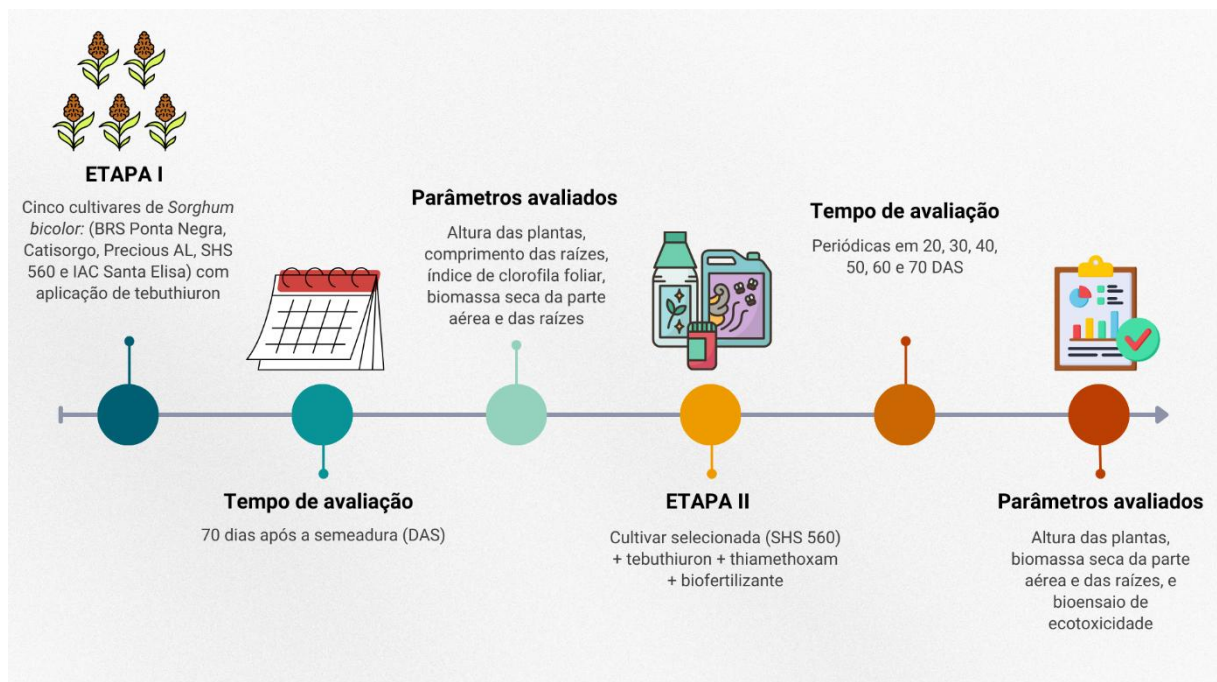
4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em estufa agrícola, na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Estadual Paulista – FCAT/Unesp, campus de Dracena, localizada nas coordenadas 21°28'57" de latitude sul e 51°31'58" de longitude oeste, com altitude média de 400 m.

Durante o período de realização dos experimentos, foram observadas as médias de temperatura e umidade relativa do ar por meio da Estação Meteorológica de Dracena – EMA/FCAT.

O trabalho foi conduzido em duas Etapas experimentais. Na Etapa I, foram avaliadas cinco cultivares de sorgo, com o objetivo de identificar aquela com melhor adaptação à presença do herbicida tebuthiuron. Na Etapa II, a cultivar selecionada foi submetida à avaliação sob diferentes fatores experimentais, incluindo a aplicação do inseticida thiamethoxam e do biofertilizante. Nessa Etapa, também foram realizados os bioensaios de ecotoxicidade para a avaliação dos potenciais efeitos ambientais dos tratamentos.

Figura 1 – Fluxograma das etapas experimentais e parâmetros avaliados.



4.1. ETAPA I

4.1.1. Solo e pesticida

O solo foi coletado na fazenda experimental da FCAT/Unesp, campus de Dracena, até a profundidade de 0,20 m, O solo do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (SANTOS *et al.*, 2025) com textura arenosa foi coletado na fazenda experimental da FCAT/Unesp em até 0,20 m de profundidade, peneirado e acondicionado dentro da estufa. Posteriormente, amostras foram submetidas à análise físico-química que revelou sua textura arenosa: 787 g/kg de areia, 139 g/kg de argila e 74 g/kg de silte. A composição química do solo antes da correção pode ser observada na Tabela 1 (Figura 2).

Em seguida, realizou-se o manejo da fertilidade do solo com base nos resultados da análise, utilizando como referência os valores propostos por Cantarella *et al.* (2022), procedendo-se à calagem e à adubação para o preparo da sementeira.

Tabela 1 – Caracterização química do solo utilizado no experimento.

Parâmetros	Valor	Unidade
pH	5,3	—
Matéria orgânica	7	g/dm ³
Potássio	1,7	—
Cálcio	9	mmolc/dm ³
Magnésio	6	mmolc/dm ³
Hidrogênio + Alumínio	10	—
Fósforo	2	—
Boro	0,06	—
Cobre	0,5	mg/dm ³
Ferro	7	mg/dm ³
Manganês	3,7	—
Saturação por bases (V%)	63	%
Soma de bases	16,7	mmolc/dm ³
Capacidade de troca catiônica (CTC)	26,7	mmolc/dm ³

Fonte: Autoria própria

Figura 2 – Solo coletado e peneirado – FCAT/UNESP.



Fonte: Autoria própria

Foi utilizado o herbicida tebuthiuron (Combine[®] 500 SC, Dow AgroSciences[®] Industrial Ltda.) aplicado conforme as recomendações da respectiva bula, nas doses de 1,0 L ha⁻¹, respectivamente. Ressalta-se que foi utilizada uma subdose do herbicida tebuthiuron, definida a partir de cálculos que consideraram sua meia-vida e persistência no solo ao longo do ciclo de produção da cana-de-açúcar (PROVENTIS LIFESCIENCE, 2020), com o objetivo de simular condições ambientais reais de solo previamente contaminado, evitando efeitos fitotóxicos severos e viabilizando a avaliação do desenvolvimento do *Sorghum bicolor*. Dessa forma, foi utilizada a subdose (0,5 L ha⁻¹), simulando um ciclo de cinco anos da cultura com aplicações nos três primeiros anos.

4.1.2. Seleção da cultivar de sorgo

Para a definição da cultivar de *Sorghum bicolor* mais tolerante ao tebuthiuron, foi conduzido previamente um experimento avaliando cinco variedades, visando identificar aquela com melhor desenvolvimento e desempenho frente à presença do herbicida. Dessa forma, a cultivar selecionada foi utilizada na segunda Etapa para a avaliação dos efeitos dos outros fatores.

Cinco cultivares de *Sorghum bicolor*, com diferentes finalidades de uso, foram utilizadas para avaliar os efeitos adversos do herbicida: (1) BRS Ponta Negra - silagem, (2) Catisorgo - silagem, (3) Precious AL - grãos, (4) SHS 560 - grãos e (5)

IAC Santa Elisa - forragem. Todas as sementes foram disponibilizadas pela BR SEEDS®.

4.1.3. Preparo das unidades experimentais

As unidades experimentais consistiram em vasos preenchidos com 4,0 L de solo. Em seguida, foram realizadas as pulverizações dos pesticidas em ambiente fechado, utilizando pulverizador laboratorial automático pressurizado por CO₂, equipado com duas pontas de jato plano Magno ADGA-03, operando à pressão de 2 bar (vazão de 0,879 L min⁻¹), espaçadas em 0,5 m, à velocidade de 5 km h⁻¹ e a 0,75 m de altura em relação ao topo dos vasos, proporcionando volume de aplicação de 211 L ha⁻¹ (Figura 3).

Figura 3 – Aplicação dos pesticidas a partir do pulverizador laboratorial automático.



Fonte: Autoria própria

Após 10 dias da aplicação do pesticida, realizou-se a semeadura de seis sementes de *S. bicolor* por vaso. Por fim, os vasos foram irrigados diariamente por um sistema automatizado, mantendo-se uma lâmina de água adequada às exigências da cultura.

4.1.4. Período de condução e avaliação do desenvolvimento vegetal

Na Etapa I, as avaliações foram realizadas apenas ao final do período de cultivo, aos 70 dias após a semeadura (DAS), entre os meses de setembro e novembro de 2024. As médias da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar neste período foram, respectivamente, 30,5 °C e 63,2 %

No dia de avaliação, foram utilizados 80 vasos para a determinação das seguintes variáveis: Altura da planta, comprimento das raízes, índice de clorofila foliar, biomassa seca da parte aérea e das raízes.

A separação das partes aérea e radicular foi realizada por meio do corte do caule rente ao solo. As raízes foram lavadas para completa remoção do solo aderido. Em seguida, cada fração foi pesada separadamente, acondicionada em sacos de papel e submetida à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por cinco dias, sendo posteriormente pesada para obtenção da massa seca.

4.1.5. Análise estatística de dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, considerando a presença ou ausência de tebuthiuron (fator A) e as cinco cultivares de sorgo (fator B), totalizando 10 tratamentos com 8 repetições, ou seja, 80 unidades experimentais na Etapa I. As interações entre os fatores foram avaliadas com o objetivo de compreender os efeitos combinados sobre o desenvolvimento vegetal e o comportamento dos contaminantes no solo. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio de rotinas desenvolvidas pelos autores no software livre R (R Core Team, 2023).

4.2. ETAPA II

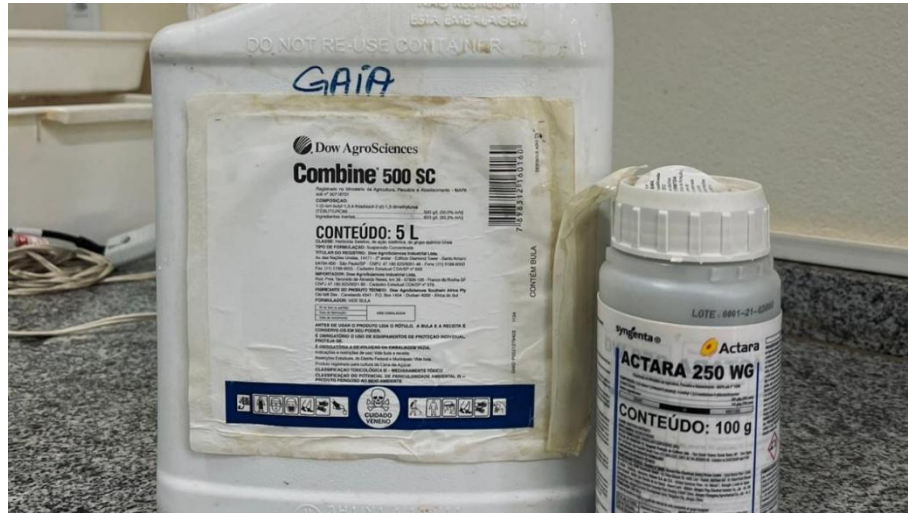
4.2.1. Solo, pesticidas, biofertilizante

Na Etapa II, foi utilizado o mesmo solo empregado na Etapa I, mantendo-se as mesmas condições edáficas, a fim de garantir a padronização experimental e a comparabilidade dos resultados entre as Etapas.

Foram utilizados o herbicida tebuthiuron (Combine® 500 SC, 500 g i.a. L⁻¹, Dow AgroSciences® Industrial Ltda.) e o inseticida thiamethoxam (Actara® 750 SG, 700 g i.a. L⁻¹, Syngenta® Proteção de Cultivos Ltda.) (PROVENTIS LIFESCIENCE, 2020; SYNGENTA, 2024), representados na Figura 4, aplicados conforme as recomendações das respectivas bulas, nas doses de 1,0 L ha⁻¹ e 1000 g ha⁻¹, respectivamente. Ressalta-se que foi utilizada uma subdose do herbicida tebuthiuron (0,5 L ha⁻¹) definida a partir de cálculos que consideraram sua meia-vida e persistência no solo ao longo do ciclo de produção da cana-de-açúcar, com o objetivo de simular condições ambientais reais de solo previamente contaminado, evitando efeitos fitotóxicos severos e viabilizando a avaliação do desenvolvimento do *Sorghum*

bicolor, da interação com o inseticida thiamethoxam e o biofertilizante, bem como a condução dos bioensaios de ecotoxicidade.

Figura 4 – Herbicida tebuthiuron (Combine® 500 SC) e inseticida thiamethoxam (Actara® 750 SG)



Fonte: Autoria própria

O biofertilizante foi fornecido pela empresa AMTec Bioagrícola®, a qual firmou parceria científica com o grupo de pesquisa. O produto apresentou características específicas com potencial para influenciar positivamente o processo de recuperação de solos com pesticidas, sendo composto por: pH 5,1; matéria orgânica 5,3%; carbono orgânico total 0,78%; fósforo (P_2O_5) solúvel em CNA + água 0,41%; fósforo (P_2O_5) total 1,18%; silício (Si) solúvel 0,04% e silício (Si) total 0,06% (Figura 5).

Figura 5 – Biofertilizante fornecido pela empresa AMTec Bioagrícola®.



Fonte: Autoria própria

4.2.2. Desenvolvimento do sorgo em solo com tebuthiuron, thiamethoxam e/ou biofertilizante

Esta Etapa foi conduzida em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial, considerando a ausência ou presença de (A) tebuthiuron, (B) thiamethoxam, (C) biofertilizante, e (D) da cultivar de *S. bicolor* selecionada na Etapa anterior. Foram constituídos oito tratamentos com oito repetições a partir de seis tempos distintos, totalizando 384 unidades experimentais.

Antes da semeadura, foi realizada a verificação da viabilidade e da dormência das sementes, conforme o Manual de Regras para Análise de Sementes - RAS (MAPA, 2009). Quando necessário, procedeu-se à quebra de dormência das sementes, de acordo com metodologias descritas por Faria (2004) e Espíndola *et al.* (2005).

4.2.3. Preparo das unidades experimentais

O preparo das unidades experimentais seguiu o mesmo procedimento da Etapa I (Figura A). Após a aplicação dos pesticidas, os tratamentos que receberam o biofertilizante seguiram as recomendações do produto comercial, ou seja, aplicação direta de 50 mL em cada vaso (Figura 6).

Após 10 dias da aplicação dos pesticidas, realizou-se a semeadura de seis sementes de *S. bicolor* por vaso (Figura 7). Esse número foi definido com base em ensaio piloto previamente conduzido e mostrou-se suficiente para o desenvolvimento das análises experimentais. Por fim, os vasos foram irrigados

diariamente por um sistema automatizado, mantendo-se uma lâmina de água adequada às exigências da cultura.

Figura 6 – Adição do biofertilizante nos vasos.



Fonte: Autoria própria

Figura 6 – Semeadura do *S. bicolor* nas unidades experimentais.



Fonte: Autoria própria

4.2.4. Período de condução e avaliação do desenvolvimento vegetal

Na Etapa II, o cultivo de *S. bicolor* foi realizado nos meses de março a maio de 2025, com encerramento do experimento aos 70 dias após a semeadura (70 DAS). O monitoramento da germinação das sementes foi realizado diariamente até o

desbaste, efetuado aos 10 DAS (Figuras 8 e 9), mantendo-se apenas uma planta por vaso. O desenvolvimento vegetal foi avaliado em seis momentos: 20, 30, 40, 50, 60 e 70 DAS. Neste período, as médias da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar neste período foram, respectivamente, 29,0 °C e 71,8 %

Figura – 8 Plantas de *S. bicolor* antes do desbaste em 10 DAS.



Fonte: Autoria própria

Figura 9 – Amostra vegetal após realizado o desbaste em 10 DAS.



Fonte: Autoria própria

Em cada período de avaliação, foram utilizados 64 vasos para a determinação das seguintes variáveis: altura das plantas medidas com régua; e biomassa seca das partes aérea e radicular.

A separação das partes aérea e radicular foi realizada por meio do corte do caule rente ao solo. As raízes foram lavadas para completa remoção do solo aderido. Em seguida, cada fração foi pesada separadamente, acondicionada em sacos de papel e submetida à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por cinco dias, sendo posteriormente pesada para obtenção da massa seca (Figura 10).

Figura 7 – Amostras sendo preparadas para a secagem em estufa para determinação da biomassa seca.



Fonte: Autoria própria

4.2.5. Bioensaios de ecotoxicidade

Foram conduzidos bioensaios com o objetivo de monitorar o potencial ecotoxicológico das amostras de solo ao longo do período experimental da Etapa II. O método adotado baseou-se em protocolos amplamente utilizados na literatura para solos agrícolas contaminados com pesticidas a partir de sementes de alface (*Lactuca sativa*) como organismo-teste, conforme metodologia descrita por Sobrero e Ronco (2004).

A determinação do efeito fitotóxico foi realizada em seis repetições, a partir do extrato aquoso (solubilizado) do solo (Figuras 12 e 13), de acordo com a NBR

10.006 (ABNT, 2004). Assim, a ecotoxicidade foi avaliada nos mesmos intervalos das análises de desenvolvimento morfológico de *S. bicolor* (20 e 70 DAS).

Os bioensaios foram conduzidos em placas de Petri contendo papel-filtro, às quais foram adicionados 2,0 mL do solubilizado e 10 sementes (Figura 13). As placas foram vedadas com filme de PVC para evitar a perda de umidade e incubadas a 20 ± 2 °C, por 120 h, ao abrigo da luz. Foram preparados controles positivos (CP), utilizando sulfato de zinco 0,05 M para inibição da germinação, e negativo (CN), com água deionizada, para avaliação da sensibilidade das sementes.

Foram determinados a germinação das sementes, o alongamento da raiz e do hipocótilo ($\geq 0,1$ mm) e o índice de germinação (GI), que integra a porcentagem de germinação (%G) e o crescimento relativo da raiz (%R) em relação ao controle negativo, conforme Labouriau e Agudo (1987).

Figura 8 – Materiais para o preparo do solubilizado das amostras de solo.



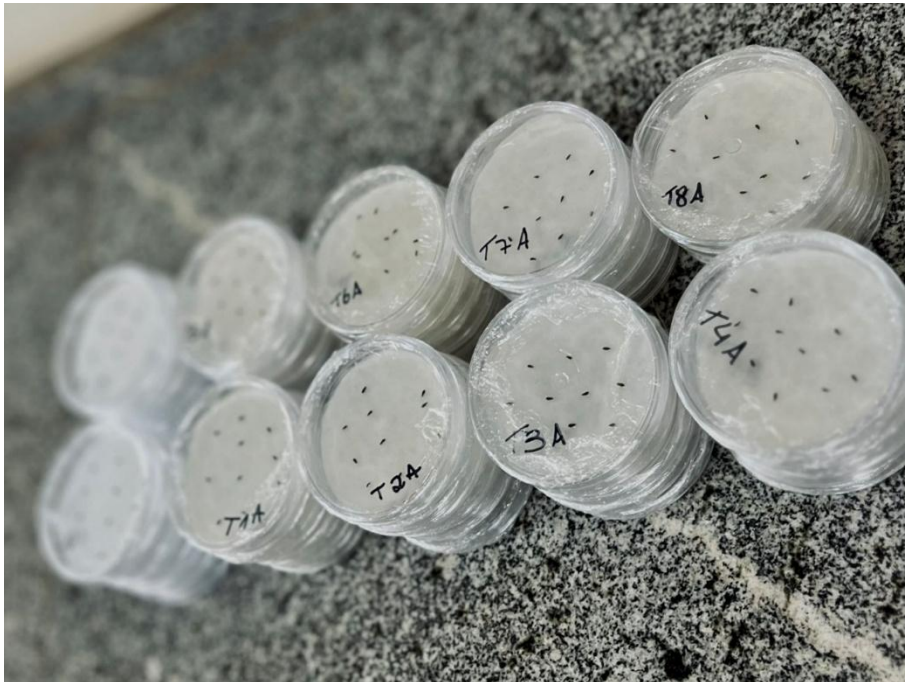
Fonte: A autoria própria

Figura 12 – Solubilizado (extrato aquoso) pronto para uso bioensaios.



Fonte: Autoria própria

Figura 9 – Bioensaios de ecotoxicidade com sementes de *Lactuca sativa* a serem incubados.



Fonte: Autoria própria

4.2.6. Determinação de concentração residual do tebuthiuron e thiamethoxam

Após o período experimental (70 DAS), as amostras de solo foram encaminhadas para a determinação das concentrações residuais de tebuthiuron e thiamethoxam no solo.

A análise foi realizada por cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas sequencial (Quechers - LC-MS/MS), após extração por solventes. Foram misturados 30 g de amostra com hexano, seguidos de agitação mecânica e filtração para eliminação do extrato orgânico. Após a filtração, foi adicionado HCl 0,1 M à amostra para nova agitação mecânica, seguida de centrifugação e filtração. O material resultante foi lavado com HCl 0,1 M e transferido para um tubo contendo clorofórmio, sendo novamente agitado e centrifugado. Em seguida, o clorofórmio foi descartado antes do ajuste do pH do sobrenadante para 4,0 com NaOH 1,0 M. Posteriormente, os volumes eluídos foram descartados, e a amostra foi transferida para uma coluna de vidro preenchida com água ultrapura e resina Chelex 100 (Bio-Rad®), previamente complexada com FeCl_3 , que também recebeu uma alíquota de HCl 6,0 M. Para homogeneização do eluato resultante, foi adicionado HCl concentrado em outra coluna de vidro previamente lavada com HCl 6,0 M e preenchida com água ultrapura e resina AG1-X8 (Bio-Rad®). Nessa coluna foram realizadas eluições com HCl 6,0 M, sendo o eluato coletado em balão volumétrico de 100 mL. Utilizando evaporador rotatório a vácuo a 60 °C, a amostra foi concentrada até completa evaporação. O extrato foi ressuscitado em água ultrapura e filtrado para frasco do injetor automático do cromatógrafo líquido.

Previamente à análise no equipamento, foi realizada a validação do método cromatográfico, com a finalidade de demonstrar a confiabilidade dos resultados, baseada nos parâmetros de seletividade, linearidade, limites de detecção (LD) e quantificação ($\text{LQ} = 0,01 \text{ mg kg}^{-1}$), exatidão e precisão. Assim, os resíduos dos pesticidas no solo foram determinados por meio da comparação da área dos picos dos extratos com padrões calibrados.

Após a conclusão da extração dos resíduos e validação do método, as análises cromatográficas foram conduzidas em sistema LC-MS/MS Shimadzu® LC/MS-8040. As separações ocorreram em coluna Raptor Polar – Restek® a 35 °C, utilizando como fases móveis acetonitrila acidificada a 0,5% (v/v) com ácido fórmico e solução aquosa de ácido fórmico a 0,5% (v/v), com fluxo de $0,4 \text{ mL min}^{-1}$. A

eluição em modo gradiente proporcionou melhor separação dos resíduos, sob as seguintes condições para a fase orgânica: 60% (0–1,5 min), 60–5% (1,5–2,5 min), 5–1% (2,5–7 min) e 4% (7–8 min). Por fim, o espectrômetro de massas foi operado em ionização positiva, com aquisição de dados no modo de monitoramento de reação multisselecionado (MRM).

Contudo, todas as amostras apresentaram resultados abaixo dos limites de identificação e quantificação do método. Esse resultado não era esperado, razão pela qual os dados não foram incluídos na seção de resultados, sendo apenas registrados como abaixo do limite de detecção do método analítico. Bem como de possíveis compostos intermediários gerados por sua degradação.

4.2.7. Análise estatística de dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, considerando a presença ou ausência de tebuthiuron (fator A), thiamethoxam (fator B) e biofertilizante (fator C). As interações entre os fatores foram avaliadas com o objetivo de compreender os efeitos combinados sobre o desenvolvimento vegetal e o comportamento dos contaminantes no solo. Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio de rotinas desenvolvidas pelos autores no software livre R (R Core Team, 2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e a discussão deste trabalho estão organizados em duas Etapas. A Etapa I teve como objetivo foi avaliar o desempenho inicial das cultivares e subsidiar a escolha daquela que apresentou melhor adaptação às condições experimentais adotadas. A Etapa II compreende as análises conduzidas com a cultivar selecionada, considerando a interação com diferentes fatores experimentais, permitindo uma avaliação mais detalhada do seu comportamento agrônomico e fisiológico. Em paralelo, resultados dos bioensaios de ecotoxicidade das amostras de solo da Etapa II possibilitam a compreensão dos potenciais efeitos ambientais associados aos tratamentos avaliados.

5.1. ETAPA I - SELEÇÃO DA CULTIVAR DE SORGO

A importância da escolha adequada é observada devido ao seu desempenho agrônomico vegetativo e ao propósito do cultivar de sorgo no solo com tebuthiuron. A BRS Ponta Negra e a SHS 560 apresentaram os maiores valores de altura da planta, mostrando que cada cultivar responde de forma diferente à exposição a um pesticida (Tabela 2). Por outro lado, o cultivar de forragem IAC Santa Elisa apresentou menor desenvolvimento da parte aérea.

Quanto ao crescimento das raízes, o efeito do herbicida também foi observado diferente para diferentes cultivares de sorgo (Tabela 2). Novamente, IAC Santa Elisa mostrou menos desenvolvimento, assim como Catisorgo. No entanto, a SHS 560 apresentou os maiores valores, destacando seu desempenho agrônomico superior em solo com tebuthiuron.

A influência dos herbicidas no desenvolvimento de plantas não alvo já foi demonstrada. Alves *et al.* (2018), observou redução de altura de *Crotalaria juncea* no solo com diferentes doses de fomesafeno. E Conciani *et al.* (2023) relataram resultados semelhantes com redução de 18% e 25% no comprimento das raízes, com 300 e 600 g ha⁻¹ de tebuthiuron, respectivamente. Esses autores também demonstraram total inibição do desenvolvimento de sorgo em concentrações mais altas (≥ 1.200 g ha⁻¹). Isso reforça que o comprimento das raízes é um dos atributos mais sensíveis à presença de herbicidas no solo, refletindo diretamente a seletividade diferencial entre cultivares e o efeito fitotóxico.

Da mesma forma, Galon *et al.* (2016) mostraram a resistência do sorgo em relação à atrazina, que não prejudicava o crescimento das plantas em altura e diâmetro. Portanto, o presente estudo permite uma nova abordagem em relação aos genótipos de sorgo com diferentes propósitos, sugerindo uma possível adaptação ou tolerância de certos cultivares em relação à presença de tebuthiuron.

Tabela 2 – Altura da planta (H), comprimento das raízes (RL) e índice de clorofila foliar (LCI) das cultivares de sorgo em 70 DAS.

Cultivares	H/cm*	RL/cm*	LCI*
Solo controle – ausência de tebuthiuron			
BRS Ponta Negra	64,08 Ab	20,16 Bc	21,77 Aa
Catisorgo	55,25 c	20,00 Ac	20,25 b
Precious AL	50,43 Bd	22,57 Bb	17,28 Bd
SHS 560	64,91 Aa	27,79 Aa	17,33 c
IAC Santa Elisa	48,91 Be	17,93 Bd	14,66 e
Presença de tebuthiuron			
BRS Ponta Negra	63,90 Ba	22,50 Ac	15,88 Bd
Catisorgo	58,00 c	16,91 Bd	20,40 a
Precious AL	57,20 Ac	25,14 Ab	19,58 Ab
SHS 560	60,00 Bb	26,25 Ba	18,40 c
IAC Santa Elisa	57,66 Ad	19,83 Ac	13,71 e

Nota: *Letras maiúsculas representam diferenças entre cada cultivar em comparação à presença ou não do herbicida; e letras minúsculas representam diferenças entre todas as cultivares no cenário de ausência ou presença do tebuthiuron no solo - Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria

Com 70 DAS, diferenças significativas também foram observadas no índice de clorofila foliar entre cultivares de sorgo, na média das condições com e sem aplicação de tebuthiuron (Tabela 2). De modo geral, o tebuthiuron causou uma diminuição, pois Catisorgo e AL Precious apresentaram os maiores impactos.

O tebuthiuron inibe o fotossistema II, o que reduz a eficiência fotoquímica e compromete a produção de ATP e NADPH (Teixeira *et al.*, 2024). Isso pode induzir estresse oxidativo por meio da formação do ROS, danificando membranas celulares, proteínas e DNA, o que compromete diretamente a funcionalidade dos cloroplastos.

O herbicida também interfere na absorção e translocação de nutrientes, afetando a disponibilidade de íons essenciais, como o magnésio, e agravando ainda mais a capacidade fotossintética das plantas (Giroto *et al.*, 2011). Esses efeitos combinados explicam o atraso observado no índice máximo de clorofila em plantas submetidas ao tebuthiuron.

Observando o comportamento das cultivares de sorgo em relação à biomassa seca, o mesmo padrão de desenvolvimento das plantas é observado na Tabela 3. Seus resultados sugerem que diferenças genéticas influenciam a capacidade das plantas de se estabelecerem e resistirem a condições adversas devido à presença de tebuthiuron. Assim, o BRS Ponta Negra (silagem) e o SHS 560 (grãos) se destacaram, mesmo no solo com o herbicida, em contraste com o pequeno desenvolvimento da espécie voltada para a produção de forragem (IAC Santa Elisa).

Tabela 3 – Biomassa seca da parte aérea (SDB) e das raízes (RDB) das cultivares de sorgo em 70 DAS.

Cultivares	SDB/g*	RDB/g*
Solo controle – ausência de tebuthiuron		
BRS Ponta Negra	4,45 Aa	24,31 Aa
Catisorgo	2,48 c	12,81 Bd
Precious AL	2,02 Bd	14,19 c
SHS 560	3,43 Bb	18,05 Ab
IAC Santa Elisa	2,00 Be	10,47 e
Presença de tebuthiuron		
BRS Ponta Negra	3,48 Bb	14,31 Bb
Catisorgo	2,65 c	14,30 Ab
Precious AL	2,48 Ad	14,21 c
SHS 560	4,19 Aa	17,09 Ba
IAC Santa Elisa	2,82 Ac	10,09 e

Nota: *Letras maiúsculas representam diferenças entre cada cultivar em comparação à presença ou não do herbicida; e letras minúsculas representam diferenças entre todas as cultivares no cenário de ausência ou presença do tebuthiuron no solo - Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Autoria própria:

As respostas contrastantes observadas entre cultivares de sorgo na presença de tebuthiuron destacam a existência de variabilidade genética quanto à tolerância a esse herbicida. O melhor desempenho do BRS Ponta Negra e SHS 560 foi observado em solo tanto com quanto sem o herbicida, enquanto o IAC Santa Elisa apresentou os piores resultados para ambas as condições. No entanto, ao comparar os resultados em cada cultivar na presença de tebuthiuron (Tabelas 2 e 3), observa-se um impacto negativo nas duas cultivares de melhor desempenho. Esse fato reforça ainda mais o potencial do BRS Ponta Negra e do SHS 560 como cultura de sucessão devido à sua alta resistência quando cultivados em solos agrícolas com concentrações residuais desse herbicida.

Ferreira *et al.* (2021) relataram que espécies não alvo, como o feijão-de-jaco (*Canavalia ensiformis*) e o feijão-do-pombo (*Cajanus cajan*), não germinaram ou sobreviveram em solos tratados com tebuthiuron. Assim, o presente estudo reforça o potencial do sorgo para se estabelecer e se desenvolver em solos com resíduos de tebuthiuron.

Para mitigar os danos agrônômicos e ambientais causados pelo uso contínuo desse herbicida, estudos recentes mostraram que resíduos orgânicos e bioinsumos podem mitigar os efeitos negativos do tebuthiuron no solo e promover o desenvolvimento das plantas (Cruz *et al.*, 2024; 2025; Frias *et al.*, 2024; Aragão *et al.*, 2025). Nesse contexto, o desempenho do BRS Ponta Negra e do SHS 560 pode ser aumentado por associação com esses compostos em estudos futuros.

Assim, novas perspectivas em estratégias de manejo sustentável para solos com resíduos de tebuthiuron devem ser investigadas usando sorgo. A avaliação comparativa de diferentes cultivares avança a compreensão da variabilidade intraespecífica na tolerância a herbicidas e apoia a seleção de genótipos mais adaptados. Além disso, essas descobertas contribuem para o desenvolvimento de práticas agrícolas voltadas para melhorar a qualidade do solo, reduzir impactos ambientais nos agroecossistemas e manter a produtividade das culturas. Portanto, essa pesquisa serve de base para estudos futuros que integrem cultivares tolerantes para expandir as aplicações potenciais do sorgo na gestão ambientalmente sustentável do solo.

5.2. ETAPA II – DESENVOLVIMENTO DO SORGO EM SOLO COM TEBUTHIURON, THIAMETHOXAM E/OU BIOFERTILIZANTE

Nesse sentido, a segunda Etapa do estudo contempla a avaliação de todos os tratamentos utilizando a cultivar previamente selecionada (SHS 560) no experimento piloto. A partir dessa Etapa, as análises têm início com a variável altura das plantas (Tabela 4), por se tratar de um parâmetro morfológico fundamental para a caracterização do crescimento e do desenvolvimento vegetal sob as condições experimentais avaliadas.

A análise da altura de plantas evidenciou efeito significativo da interação entre os tratamentos e o tempo de avaliação, indicando que o crescimento do sorgo foi influenciado de forma diferenciada ao longo do ciclo de desenvolvimento em função das condições impostas pelos tratamentos avaliados (Tabela 4).

Tabela 4 – Altura de plantas (cm) da cultivar de sorgo SHS 560 em relação ao tempo de desenvolvimento e às amostras de solo

Tratamentos / Tempo	20 DAS	30 DAS	40 DAS	50 DAS	60 DAS	70 DAS
CONTROLE	25,25 C	33,13 BC	31,13 bC	40,50 AB	40,00 AB	44,69 A
TBT	28,38 C	29,13 BC	34,75 bBC	42,00 AB	39,75 ABC	46,25 A
TMX	29,25 C	34,63 BC	33,00 bCD	45,00 AB	43,75 AB	52,13 A
BIOF	27,00 D	28,25 CD	32,63 bCD	40,63 BC	49,88 AB	55,63 A
TBT + TMX	24,88 C	27,75 C	36,25 bBC	43,50 AB	45,50 AB	50,38 A
TBT + BIOF	30,50 D	34,50 CD	36,00 bCD	44,25 BC	51,25 B	65,38 A
TMX + BIOF	26,50 D	35,50 CD	37,63 bBCD	40,00 BC	50,38 AB	56,38 A
TBT + TMX + BIOF	28,25 C	30,00 C	38,25 bBC	37,50 BC	46,00 AB	55,75 A

Nota: *Legenda: CONTROLE – apenas a planta de sorgo; TMX – thiamethoxam; TBT – tebutiuron; BIOF – biofertilizante; DAS – dias após a semeadura. *Letras maiúsculas e minúsculas representam, respectivamente, diferenças em relação ao tempo para um mesmo tratamento e em relação aos tratamentos para um mesmo tempo - Tukey ($p \leq 0,05$).*

Fonte: Autoria própria

De modo geral, na Tabela 4, aos 20 dias após a semeadura, observaram-se os menores valores de altura, independentemente do tratamento aplicado, com médias variando de 24,88 a 30,50 cm. Nessa fase inicial de desenvolvimento, não foram detectadas diferenças expressivas entre os tratamentos, evidenciando um crescimento ainda limitado das plantas. O menor valor foi registrado para o tratamento

com tebuthiuron associado ao thiamethoxam (24,88 cm), enquanto o tratamento com tebuthiuron associado ao biofertilizante apresentou a maior média nesse período (30,50 cm).

Na Tabela 4, aos 30 dias após a semeadura, verificou-se um aumento gradual da altura das plantas, com valores variando de 27,75 a 35,50 cm. De forma geral, os tratamentos mantiveram comportamento semelhante, sem diferenças marcantes. O tratamento com thiamethoxam associado ao biofertilizante apresentou a maior média (35,50 cm), enquanto o tratamento com tebuthiuron associado ao thiamethoxam permaneceu entre os menores valores observados (27,75 cm).

Na avaliação realizada aos 40 dias após a semeadura, passaram a ser observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos. O tratamento com thiamethoxam associado ao biofertilizante apresentou elevada altura média (37,63 cm), assim como o tratamento com tebuthiuron, thiamethoxam e biofertilizante em associação (38,25 cm). Em contrapartida, o tratamento controle, composto apenas por sorgo, apresentou menor valor (31,13 cm), assim como o tratamento com thiamethoxam isolado (33,00 cm), indicando respostas distintas ao longo do desenvolvimento vegetal (Tabela 4).

O crescimento das plantas tornou-se mais expressivo, na Tabela 3, aos 50 dias após a semeadura, com médias variando de 37,50 a 45,00 cm. O tratamento com thiamethoxam isolado apresentou a maior altura (45,00 cm), enquanto o tratamento com tebuthiuron, thiamethoxam e biofertilizante em associação apresentou o menor valor observado nesse período (37,50 cm). Ainda assim, a maioria dos tratamentos apresentou comportamento semelhante, evidenciando tendência de crescimento contínuo.

Chegando quase no final do experimento, a avaliação realizada aos 60 dias após a semeadura, observaram-se incrementos adicionais na altura das plantas, com valores variando de 39,75 a 51,25 cm. Os tratamentos associados ao biofertilizante destacaram-se nessa fase, com ênfase para o tratamento com tebuthiuron associado ao biofertilizante, que apresentou média de 51,25 cm, seguido pelo tratamento com thiamethoxam associado ao biofertilizante (50,38 cm). O tratamento com tebuthiuron isolado apresentou o menor valor nesse período (39,75 cm) (Tabela 4).

Por fim, aos 70 dias após a semeadura, na Tabela 3 foram registrados os maiores valores de altura de todo o experimento, com médias variando de 44,69 a 65,38 cm. O tratamento com tebuthiuron associado ao biofertilizante apresentou o

maior valor observado (65,38 cm), diferindo dos demais tratamentos. Em seguida, destacaram-se os tratamentos com thiamethoxam associado ao biofertilizante (56,38 cm), biofertilizante isolado (55,63 cm) e a associação entre tebuthiuron, thiamethoxam e biofertilizante (55,75 cm). O tratamento controle, composto apenas por sorgo, apresentou a menor altura nessa fase final (44,69 cm), embora tenha mantido crescimento progressivo ao longo do ciclo.

Biofertilizantes têm sido associados ao estímulo do crescimento vegetal por meio da melhoria da disponibilidade de nutrientes e da ativação de processos fisiológicos, podendo refletir em maior desenvolvimento da parte aérea e incremento da altura final das plantas (Singh *et al.*, 2024).

Estudos relatam que o thiamethoxam pode atuar como bioativador, promovendo maior uniformidade no crescimento e no desenvolvimento inicial das plantas, o que pode se refletir em padrões de crescimento mais regulares ao longo do tempo (Castro *et al.*, 2013; Tavares *et al.*, 2016).

Para a Biomassa seca da parte aérea (SDB) (Tabela 5, houve efeito significativo dos tratamentos ($p < 0,01$) e do tempo de avaliação ($p < 0,01$), enquanto a interação tratamento \times tempo não foi significativa, indicando que o comportamento dos tratamentos foi semelhante ao longo do período experimental.

Tabela 5 – Biomassa seca da parte aérea (SDB) (g) da cultivar de sorgo SHS 560 em relação à média geral dos tempos de desenvolvimento e às amostras de solo

TRATAMENTOS	SDB (g)	
CONTROLE	0,4170	b
TBT + BIOF	0,7401	a
BIOF	0,6818	a
TBT + TMX + BIOF	0,6569	ab
TMX + BIOF	0,6131	ab
TMX	0,5666	ab
TBT + TMX	0,5156	ab
TBT	0,5055	ab

Nota: *Legenda: CONTROLE – apenas a planta de sorgo; TMX – thiamethoxam; TBT – tebuthiuron; BIOF – biofertilizante. * Valores seguidos por letras iguais não diferem entre si - Tukey ($p \leq 0,05$).*

Fonte: Autoria própria

O tratamento composto por tebuthiuron associado ao biofertilizante apresentou a maior média de massa seca da parte aérea (0,7401 g), diferindo estatisticamente do tratamento controle, que apresentou o menor valor observado (0,4170 g), conforme o teste de Tukey (Tabela 5).

O tratamento com biofertilizante isolado também apresentou elevado valor de massa seca da parte aérea (0,6818 g), não diferindo estatisticamente do tratamento com tebuthiuron associado ao biofertilizante, sendo ambos agrupados no grupo de maior desempenho.

Os tratamentos tebuthiuron + thiamethoxam + biofertilizante (0,6569 g), thiamethoxam + biofertilizante (0,6131 g), thiamethoxam isolado (0,5666 g), tebuthiuron + thiamethoxam (0,5156 g) e tebuthiuron isolado (0,5055 g) apresentaram valores intermediários de massa seca da parte aérea. Esses tratamentos não diferiram estatisticamente nem dos tratamentos de maior desempenho nem do tratamento controle, sendo agrupados na classe intermediária pelo teste de Tukey.

De modo geral, os resultados indicam que os maiores valores de massa seca da parte aérea foram observados nos tratamentos associados ao biofertilizante, especialmente na presença de tebuthiuron, enquanto o tratamento controle apresentou o menor acúmulo de biomassa aérea. Os demais tratamentos apresentaram comportamento intermediário, conforme evidenciado pela sobreposição dos grupos estatísticos apresentados na Tabela 5.

A massa seca da parte aérea tem se mostrado um parâmetro sensível para detectar a presença de tebuthiuron no solo, uma vez que o aumento das doses do herbicida resulta em redução progressiva do acúmulo de biomassa aérea, incluindo em plantas de sorgo (Ferreira *et al.*, 2021). Além disso, o uso de biofertilizantes pode resultar em aumento significativo da massa seca da parte aérea, em razão da melhoria da nutrição vegetal e da eficiência metabólica das plantas (Vessey, 2003).

Em gramíneas, a aplicação de biofertilizantes tem sido associada ao aumento da massa seca da parte aérea, indicando maior eficiência no crescimento vegetativo das plantas (Mahanty *et al.*, 2017).

Na Tabela 5, verificou-se que a presença do biofertilizante sozinho ou em combinação com o tebuthiuron apresentaram desempenho superior em comparação à amostra controle. Esse resultado sugere que a adoção de bioinsumos pode contribuir para a redução dos impactos fitotóxicos do herbicida, favorecendo o desenvolvimento vegetal mesmo em condições de estresse químico. Nesse contexto,

a integração de estratégias como o uso de insumos biológicos e o cultivo de espécies com maior rusticidade tem sido apontada na literatura como uma alternativa eficiente para atenuar efeitos residuais de pesticidas no solo (Cruz *et al.*, 2024; 2025; Frias *et al.*, 2024; Aragão *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o desempenho do BRS Ponta Negra e do SHS 560 pode ser aumentado por associação com esses compostos em estudos futuros.

A Tabela 6 apresenta a Biomassa seca das raízes (RDB) das plantas submetidas aos diferentes tratamentos ao longo do período experimental. Observa-se efeito significativo do tempo e da interação tratamento x tempo sobre a produção de biomassa radicular, evidenciando que as respostas dos tratamentos variaram de acordo com o avanço do ciclo de desenvolvimento das plantas.

Tabela 6 - Biomassa seca das raízes (RDB) (g) da cultivar de sorgo SHS 560 em relação ao tempo de desenvolvimento e às amostras de solo

Tratamento / Tempo	20 DAS	30 DAS	40 DAS	50 DAS	60 DAS	70 DAS
SORGO	0,11 C	0,37 B	0,33 bC	0,54 BC	1,42 AB	1,06 B
TBT	0,11 C	0,33 B	0,41 bBC	1,34 AB	1,33 AB	1,74 AB
TMX	0,18 C	0,55 B	1,52 aA	1,00 AB	0,93 B	1,37 B
BIOF	0,16 C	0,36 B	0,53 abBC	2,28 aA	1,06 AB	1,83 AB
TBT + TMX	0,14 C	0,43 B	0,43 bBC	0,90 AB	0,43 B	1,39 B
TBT + BIOF	0,11 C	0,79 B	0,57 abBC	0,79 BC	2,08 A	2,48 A
TMX + BIOF	0,19 C	0,55 B	0,56 abBC	1,25 AB	1,40 AB	2,03 AB
TBT + TMX + BIOF	0,19 C	0,74 B	0,44 bBC	0,59 BC	1,60 AB	1,62 AB

Nota: *Legenda: CONTROLE – apenas a planta de sorgo; TMX – thiamethoxam; TBT – tebutiuron; BIOF – biofertilizante; DAS – dias após a semeadura. *Letras maiúsculas e minúsculas representam, respectivamente, diferenças em relação ao tempo para um mesmo tratamento e em relação aos tratamentos para um mesmo tempo - Tukey ($p \leq 0,05$).*

Fonte: Autoria própria

A massa seca da raiz apresentou efeito significativo da interação entre tratamentos e tempos de avaliação, evidenciando que o acúmulo de biomassa radicular do sorgo variou ao longo do ciclo em função das condições experimentais impostas (Tabela 6). De modo geral, aos 20 e 30 dias após a semeadura, observaram-se os menores valores de massa seca da raiz, sem diferenças estatísticas entre os

tratamentos, indicando desenvolvimento radicular ainda incipiente nessas fases iniciais.

É notório na tabela 6, aos 40 e 50 dias após a semeadura, passaram a ser observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos. Destacou-se o tratamento com thiametoxam isolado aos 40 dias após a semeadura, apresentando maior valor de massa seca da raiz, bem como o tratamento com biofertilizante isolado aos 50 dias após a semeadura, que apresentou o maior valor observado nesse período. Os demais tratamentos apresentaram valores intermediários, evidenciando respostas distintas do sistema radicular ao longo do desenvolvimento.

Na parte final do experimento, demonstrado na Tabela 6, avaliações realizadas aos 60 e 70 dias após a semeadura, os maiores valores de massa seca da raiz foram observados nos tratamentos associados ao biofertilizante, com destaque para o tratamento com tebuthiuron associado ao biofertilizante, que apresentou os maiores valores na fase final do experimento. O tratamento controle apresentou os menores valores nessas avaliações, embora tenha mantido incremento progressivo ao longo do tempo, confirmando a influência positiva do biofertilizante no acúmulo de biomassa radicular nas fases mais avançadas do desenvolvimento do sorgo.

O aumento da massa seca da raiz ao longo do período experimental é compatível com o padrão de desenvolvimento do sistema radicular descrito para gramíneas, no qual o acúmulo de biomassa se intensifica nos estágios mais avançados do ciclo (Ribas, 2008; Taiz *et al.*, 2017).

De forma integrada, a avaliação da cultivar SHS 560 em interação com os diferentes tratamentos evidenciou que o desenvolvimento das plantas foi fortemente condicionado pelo avanço do período experimental. As variáveis analisadas apresentaram incrementos progressivos ao longo do ciclo, com respostas diferenciadas entre os tratamentos, especialmente nas fases mais avançadas do desenvolvimento vegetal.

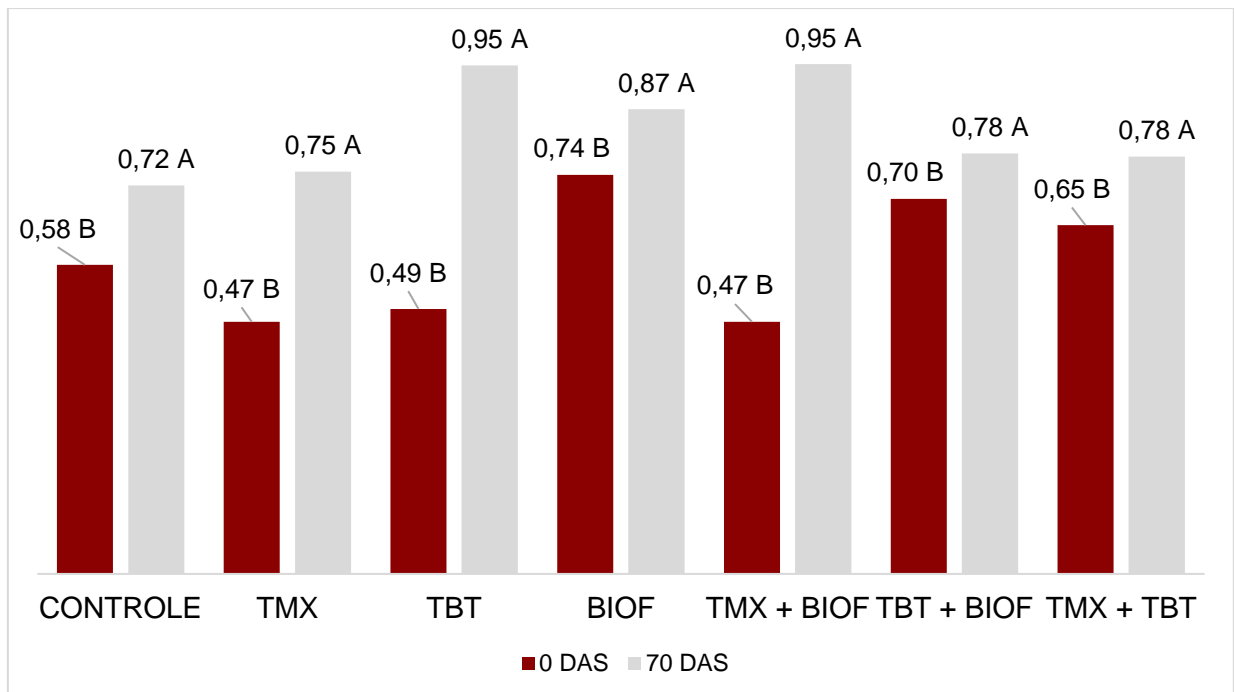
A altura das plantas e a massa seca da parte aérea apresentaram comportamento predominantemente dependente do tempo de avaliação, com diferenças entre os tratamentos tornando-se mais evidentes nos estágios finais do experimento. De modo geral, os maiores valores dessas variáveis foram observados nos tratamentos associados ao biofertilizante, indicando maior crescimento vegetativo e acúmulo de biomassa aérea em comparação ao tratamento controle.

Por sua vez, a massa seca da raiz mostrou-se mais sensível à interação entre os tratamentos e os períodos de avaliação, evidenciando respostas específicas do sistema radicular às diferentes combinações de insumos ao longo do ciclo de desenvolvimento. Os tratamentos que incluíram o biofertilizante, isolado ou em associação com tebuthiuron e/ou thiamethoxam, apresentaram os maiores valores de biomassa radicular nas avaliações finais, reforçando a influência positiva desses tratamentos no crescimento e na alocação de biomassa da cultivar avaliada.

5.2.1. Bioensaios de ecotoxicidade

Considerando a avaliação dos bioensaios de ecotoxicidade a partir do índice de germinação (IG) do organismo-teste *Lactuca sativa* nas diferentes amostras de solo, os resultados apresentados na Figura 14 evidenciaram diferenças estatísticas principalmente em função do tempo de avaliação.

Figura 10 – Índice de germinação das plântulas de alface nos bioensaios de ecotoxicidade nos tempos inicial (0 DAS) e final (70 DAS) para as diferentes amostras de solo a partir do cultivar de SHS 60.



Nota: *Legenda: CONTROLE – apenas a planta de sorgo; TMX – thiamethoxam; TBT – tebuthiuron; BIOF – biofertilizante; DAS – dias após a semeadura. * Letras maiúsculas indicam diferença significativa entre os tempos de avaliação para cada tratamento - Tukey (p ≤ 0,05).*

Fonte: Autoria própria

Os tratamentos não apresentaram diferença significativa entre si, sendo o tempo o principal fator de influência sobre os resultados observados. Assim, as variações verificadas ao longo das avaliações estiveram associadas à evolução temporal do sistema solo-planta, e não à aplicação dos diferentes compostos.

Esse comportamento difere do observado por Villaverde *et al.* (2018) e Lara-Moreno *et al.* (2022), que relataram redução do potencial ecotoxicológico em solos tratados com bioinsumos. Os efeitos benéficos foram atribuídos diretamente à ação dos produtos aplicados, enquanto, no presente trabalho, a atenuação foi mais relacionada aos processos naturais de degradação, dissipação e transformação dos compostos no solo ao longo do período de cultivo. Por outro lado, os resultados obtidos estão de acordo com Frias *et al.* (2024), que avaliaram o uso de milho na mitigação da ecotoxicidade de solos contaminados com tebuthiuron e thiamethoxam, e observaram respostas positivas ao longo do tempo. Considerando que o milho e o sorgo pertencem à mesma família botânica (Poaceae), os resultados do presente estudo reforçam a capacidade de culturas tolerantes em reduzir o potencial ecotoxicológico do solo ao longo do período de cultivo.

6. CONCLUSÃO

O *Sorghum bicolor* apresentou potencial para uso em processos de atenuação dos efeitos negativos e recuperação de solos contendo tebuthiuron e thiamethoxam, especialmente quando associado à aplicação de biofertilizante.

As cultivares BRS Ponta Negra e SHS 560 demonstraram tolerância ao herbicida tebuthiuron, mantendo desenvolvimento satisfatório ao longo do período experimental. Destaca-se, contudo, a cultivar SHS 560, que apresentou desempenho mais consistente em relação à BRS Ponta Negra, o que fundamentou sua seleção para a condução da Etapa II do experimento.

O desenvolvimento vegetal do sorgo foi influenciado pelo tempo de cultivo, com respostas moduladas pela associação entre os pesticidas e o biofertilizante, sendo observados maiores incrementos nos tratamentos com o bioinsumo.

O potencial ecotoxicológico do solo foi reduzido ao longo do cultivo vegetal, indicando que o estabelecimento da cultura contribuiu para a diminuição dos efeitos residuais dos compostos avaliados.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam que o cultivo do sorgo, especialmente quando associado ao biofertilizante, representa uma estratégia promissora para favorecer o desenvolvimento vegetal e contribuir para a redução do impacto residual de pesticidas em solos agrícolas. A abordagem adotada integrou aspectos agronômicos e ambientais, ampliando a compreensão do comportamento no solo de produtos amplamente utilizados, como o tebuthiuron e o thiamethoxam.

Os bioensaios de ecotoxicidade destacaram a importância do fator temporal e da presença da planta na diminuição do potencial ecotoxicológico do solo, reforçando o valor de métodos biológicos como ferramentas complementares às avaliações agronômicas convencionais.

Embora conduzido em condições controladas, o estudo fornece subsídios técnicos relevantes para o aprimoramento de práticas de manejo mais sustentáveis. Como perspectiva futura, sugere-se a ampliação das análises ecotoxicológicas com maior diversidade de organismos-teste, bem como a inclusão de avaliações fisiológicas mais detalhadas, visando aprofundar o entendimento dos processos envolvidos e ampliar a aplicabilidade dos resultados em condições de campo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. NBR 10006. Rio de Janeiro. ABNT, 2004.

AGÊNCIA EUROPEIA DE PRODUTOS QUÍMICOS (ECHA). **Tebuthiuron: infocard de substância**. Helsinque, 2021. Disponível em: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.04>. Acesso em: 30 nov. 2025.

ALEKSEEVA, T.; ALEKSEEV, A.; XU, R. Soil processes controlling pesticide fate and behavior. **Geoderma**, v. 226–227, p. 1–10, 2014.

ALVES, C.; GALON, L.; KAIZER, R. R.; HOLZ, C. M.; WINTER, F. L.; BASSO, F. J. M. Selection of species with soil phytoremediation potential after the application of protoxinhibiting herbicides. **Weed**, v. 36, e018174765, 2018.

ANAND, S.; BHARTI, S. K.; KUMAR, S.; BARMAN, S. C.; KUMAR, N. Phytoremediation of heavy metals and pesticides present in water using aquatic macrophytes. In: *Phyto and rhizo remediation*. **Singapore: Springer**, 2019. p. 89–119.

ARAGÃO, M. B.; RIBEIRO, E. R.; FRIAS, Y. A.; CRUZ, V. H.; VALÉRIO, T. S.; BATISTA, A. R.; FERREIRA, P. H. F.; SIMIONATO, H. H.; LOPES, P. R. M. Evaluation of leguminous plants as phytoremediator species in soil with pesticide and vinasse interactions. **Plants**, v. 14, p. 3137, 2025.

ARIAS-ESTÉVEZ, M.; LÓPEZ-PERIAGO, E.; MARTÍNEZ-CARBALLO, E.; SIMAL-GÁNDARA, J.; MEJUTO, J. C.; GARCÍA-RÍO, L. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 123, n. 4, p. 247–260, 2008.

ARYAL, M. Phytoremediation Strategies for Mitigating Environmental Toxicants. **Heliyon**, v. 10, p. e38683, 2024.

ASANTE-BADU, B.; KGORUTLA, L. E.; LI, S. S.; DANSO, P. O.; XUE, Z.; QIANG, G. Phytoremediation of organic and inorganic compounds in a natural and an agricultural environment: a review. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 18, n. 5, p. 6875–6904, 2020.

ASHRAF, S.; ALI, Q.; ZAHIR, Z. A.; ASHRAF, S.; ASGHAR, H. N. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 174, p. 714–727, 2019.

BASSEY, M. S.; KOLO, M. G. M.; DANIYA, E.; ODOFIN, A. J. Impacto da prática de cobertura morta e manejo de ervas daninhas em algumas propriedades do solo, dinâmica das plantas daninhas e genótipos da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) nas culturas de plantas. **Sugar Tech**, Nova Délhi, v. 23, p. 395–406, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00896-9>.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Perfil ambiental: thiamethoxam. Brasília, 2019. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/agrotoxicos/perfisambientais/2019/Perfil%20Ambiental%20-%20Tiametoxam%20-%202002_10_2019.pdf. Acesso em: 20 jan. 2026.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**. Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários (AGROFIT). Brasília, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/agrofit>. Acesso em: 20 jan. 2026.

BUTLER, A. D.; WYNTER, M.; MEDINA, V. F.; BEDNAR A. J. Toxicidade, acúmulo e absorção de urânio empobrecido em *Cynodon dactylon* (Bermuda) e *Aristida purpurea* (Threeawn roxo). **Boletim de contaminação ambiental e toxicologia**, v. 96, p. 714-719, 2016.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO J.A.; MATTOS D.J.; BOARETTO R.M.; VAN RAIJ B. Bulletin 100: Fertilization and Liming Recommendations for the State of São Paulo, IAC, Campinas, 2022, p. 489. **Boletim 100**: Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.

CASTRO, P. R. C.; SERCILOTO, C. M.; PEREIRA, M. A.; RODRIGUES, J. D. Bioactivator action of thiamethoxam on plant growth. **Pest Technology**, v. 7, n. 1, p. 1–5, 2013.

CHOUDHARY, M.; JETLEY, REINO UNIDO; KHAN, M. A.; ZUTSHI, S.; FATMA, T.; AHMAD, P. Efeito do estresse dos metais pesados sobre a atividade da prolina,

malondialdeído e superóxido dismutase na cianobactéria *Spirulina platensis*-S5. **Ecotoxicologia e segurança ambiental**, v. 66, n. 2, p. 204-209, 2007.

CONCIANI, P. A.; MENDES, K. F.; SOUSA, R. N.; RIBEIRO, A. P.; PIMPINATO, R. F.; TORNISIELO, V. L. Amendoim e sorgo são excelentes fitoremediadores de ¹⁴C-tebuthiuron em solo contaminado por herbicidas. **Avanços na Ciência das Plantas Invasoras**, v. 41, p. e020220068, 2023. DOI: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2023;41:e020220068>.

CONCIANI, P. A.; MENDES, K. F.; SOUSA, R. N.; RIBEIRO, A. P.; PIMPINATO, R. F.; TORNISIELO, V. L. Peanut and sorghum are excellent phytoremediators of ¹⁴C-tebuthiuron in herbicide-contaminated soil. **Advances in Weed Science**, v. 41, e020220068, 2023.

CRUZ, V. H.; MOREIRA, B. R. A.; VALÉRIO, T. S.; FRIAS, Y. A.; SILVA, V. L.; MORAIS, E. B.; VASCONCELOS, L. G.; TROPALDI, L.; PRADO, E. P.; MONTAGNOLLI, R. N.; LOPES, P. R. M. Leguminous plants and microbial inoculation: an approach for biocatalytic phytoremediation of tebuthiuron in agricultural soil. **Agronomy**, v. 14, p. 2805, 2024.

CRUZ, V. H.; PERFEITO, D. M.; OLIVEIRA, T. L.; FRIAS, Y. A.; VALÉRIO, T. S.; NASCIMENTO, V. D.; MAIA, J. P.; LOPES, P. R. M. Microbial inoculants and sugarcane residues promote *Mucuna pruriens* development in tebuthiuron-affected soil: biological amendments support plant growth in polluted substrate. **Environments**, v. 12, p. 431, 2025.

CRUZ, V. H.; SIMIONATTO, H. H.; RIBEIRO, E. R.; FRIAS, Y. A.; VALÉRIO, T. S.; LOPES, P. R. M. Multifunctional biological approaches for enhanced pesticide removal in agroecosystems: a path toward soil remediation. **Frontiers in Agronomy**, Lausanne, v. 7, e1686748, 2026.

EEVERS, N.; WHITE, J. C.; VANGRONSVELD, J.; WEYENS, N. Bio- and phytoremediation of pesticide-contaminated environments: a review. In: SPARKS, D. L. (ed.). **Advances in agronomy**. San Diego: Academic Press, 2012. v. 117, p. 289–336.

ESPINDOLA, J. A. A. **Adubação verde com leguminosas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

FARIA, M. A.; LOPES, P. R. M.; BIDOIA, E. D.; FERREIRA, L. C.; VIANA, R. S.; PRADO, E. P.; BONINI, C. S. B.; TOMAZ, R. S. Vinasse and tebuthiuron application to sugarcane soil and its effects on bacterial community and ecotoxicity after natural attenuation. **International Journal of Development Research**, v. 09, n. 08, p. 28898-28904, 2019.

FARIA, R. T.; SOUZA, J. P.; OLIVEIRA, L. R.; SILVA, A. A. Bioensaios ecotoxicológicos com *Lactuca sativa* submetida a diferentes doses de tebuthiuron e vinhaça após atenuação natural do solo. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 54, p. 112–124, 2019.

FERREIRA, J. H. S.; MELO, C. A. D.; MORAES, M. F.; SILVA, I. P. F. E.; CHIORDEROLI, C. A. Atividade residual e sorção de tebuthiuron em diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 28, n. 2, e275280, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n2e275280>.

FERREIRA, J. H. S.; QUEIROZ, M. C. M.; SILVA, I. P. F.; MELO, C. A. D. Seleção de espécies bioindicadoras da presença de tebuthiuron no solo. **Agrarian**, Dourados, v. 14, n. 52, p. 203–212, 2021. DOI: [10.30612/agrarian.v14i52.13276](https://doi.org/10.30612/agrarian.v14i52.13276).

FERREIRA, L. C.; MOREIRA, B. R. A.; MONTAGNOLLI, R. N.; PRADO, E. P.; VIANA, R. S.; TOMAZ, R. S.; CRUZ, J. M.; BIDOIA, E. D.; FRIAS, Y. A.; LOPES, P. R. M. Espécies de estrume verde para fitorremediação do solo com tebuthiuron e vinasse. **Fronteiras em Bioengenharia e Biotecnologia**, v. 8, p. 613642, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.613642>.

FREITAS, M. C.; ALMEIDA, R. F.; PEREIRA, J. L.; COSTA, A. C. Ecotoxicologia aplicada à avaliação de pesticidas em solos tropicais. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 45, n. 3, p. 587–601, 2026.

FRIAS, Y. A.; LIMA, E. W. ; ARAGÃO, M. B.; NANTES, L. S.; MOREIRA, B. R. A.; CRUZ, V. H.; TOMAZ, R. S.; LOPES, P. R. M. *Mucuna pruriens* não consegue desenvolver a fitorremediação do tebuthiuron em solo agrícola com vinasse: uma análise morfométrica e ecotoxicológica. **Fronteiras em Bioengenharia e Biotecnologia**, v. 11, n. 1156751, 2023.

FRIAS, Y. A.; VALÉRIO, T. S.; MOREIRA, B. R. A.; CRUZ, V. H.; SANTOS, A. L.; ANDRIOLLI, V.; PINCERATO, G. M. T.; LOPES, P. R. M. *Pennisetum glaucum* in

reducing ecotoxicity in soil with tebuthiuron, thiamethoxam and vinasse. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101470, 2024.

GALON, L.; FERNANDES, F. F.; ANDRES, A.; SILVA, A. F.; FORTE, C. T. Selectivity and efficiency of herbicides in weed control on sweet sorghum. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 2, p. 123–131, 2016.

GENTIL, C.; CARVALHO, F. P.; DIONÍSIO, I.; MOURA, I. Fate of pesticides in soils: Environmental factors and modeling approaches. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 30550–30567, 2019.

GHIRARDELLO, G. A.
Efeitos de herbicidas residuais nas culturas de soja e sorgo cultivados em áreas de renovação de cana-de-açúcar. 2024. 95 f. Tese (Doutorado em Ciências – Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2024.

GIROTTI, M.; ARALDI, R.; VELINI, E. D.; GOMES, G. L. G. C.; CARBONARI, C. A.; JASPER, S. P.; TRINDADE, L. M. B. Photosynthetic efficiency of sugarcane submitted to atrazine and tebuthiuron application in pre-emergence. **Brazilian Journal of Herbicides**, v. 10, n. 2, p. 134–142, 2011.

GONÇALVES, L. M.; RIBEIRO, M. F.; SANTOS, T. R.; BARBOSA, R. S. Avaliação ecotoxicológica de solos agrícolas contaminados por herbicidas utilizando *Lactuca sativa* como bioindicador. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 51, n. 8, p. 623–631, 2016.

GOUVEIA, D. S.; OLIVEIRA, E. A. de.; GOUVEIA, D. S.; MORAIS, S. K. Q.; FELIPE, K.; TOMÉ, A. E. S.; SARAIVA, M. M. T. Avaliação da toxicidade dos resíduos do abacaxi utilizando o bioensaio de *Artemia salina*. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 12, n. 10, p. e20121043275-e20121043275, 2023.

HUANG, J.; KHAN, M. T.; PERECIN, D.; COELHO, S. T.; ZHANG, M. Cana-de-açúcar para produção de bioetanol: Potencial do bagaço na perspectiva chinesa. **Revisões de Energia Renovável e Sustentável**, Amsterdã, v. 133, p. 110296, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110296>.

ISO, PNEN. 11269: 2; Determinação dos efeitos dos poluentes na flora do solo. Parte 2: Efeitos do Solo Contaminado na Emergência e Crescimento Precoce das Plantas

Superiores. **Organização Internacional de Padronização (ISO): Genebra, Suíça, 2012.**

KAFLE, A.; TIMILSINA, A.; GAUTAM, A.; ADHIKARI, K.; BHATTARAI, A.; ARYAL, N. Phytoremediation: mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. **Environmental Advances**, v. 8, p. 100203, 2022.

KARISHMA, S.; SARAVANAN, A.; DEIVAYANAI, V. C.; AJITHKUMAR, EUA; YAASHIKAA, P. R.; VICKRAM, A. S. Estratégias emergentes para aprimorar a degradação microbiana de hidrocarbonetos de petróleo: Perspectivas e desafios. **Bioresource Technology Reports**, v. 26, p. 101866, 1º de junho de 2024.

LABOURIAU, L. G.; AGUDO, M. On the physiology of seed germination in *Salvia hispanica* L. I. Temperature effects. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 59, p. 37-56, 1987.

LARA-MORENO, A.; MORILLO, E.; MERCHÁN, F.; MADRID, F.; VILLAVERDE, J. Bioremediation of a trifluralin contaminated soil using bioaugmentation with novel isolated bacterial strains and cyclodextrin. **Science of The Total Environment**, v. 840, p. 156695, 2022.

LIMA, D. S. **Bioensaios ecotoxicológicos aplicados à avaliação de solos contaminados**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

LIU, S.; YANG, B.; LIANG, Y.; XIAO, Y.; FANG, J. Prospect of phytoremediation combined with other approaches for remediation of heavy metal-polluted soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 14, p. 16069–16085, 2020.

MADEIRA, C. L.; ACAYABA, R. D.; SANTOS, V. S.; VILLA, J. E. L.; JACINTO-HERNÁNDEZ, C.; AZEVEDO, J. A. T. Descobrimos o impacto das atividades agrícolas e urbanização nos rios das bacias de Piracicaba, Capivari e Jundiá em São Paulo, Brasil: um levantamento de pesticidas, hormônios, farmacêuticos, produtos químicos industriais e PFAS. **Chemosphere**, Oxford, v. 341, p. 139954, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139954>.

MAGALHÃES, D. P.; FERRÃO FILHO, A. S. **Ecotoxicologia: perspectivas e aplicações**. São Carlos: Rima, 2008.

MAHANTY, T.; BHATTACHARJEE, S.; GOSWAMI, M.; BHATTACHARJEE, P.; DAS, B.; GHOSH, A. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

MALDONADO, M.; DIMITRI, L.; GIORLANDO, P.; LEONEL, L.; ADRIAN, B.; SIMÓN, C.; TELLEZ, V. E.; ZARAGOZA, C. Efeito da bioestimulação na biorremediação de águas provenientes do processo de debittering de azeitonas. **Avanços Ambientais**, v. 10, p. 100321, 1 dez. 2022.

MALIK, Z.; AHMAD, M.; ABASSI, G. H.; DAWOOD, M.; HUSSAIN, A.; JAMIL, M. Agrochemicals and soil microbes: interaction for soil health. In: **Xenobiotics in the soil environment**. Cham: Springer, 2017. p. 139–152.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. 1ª edição. Brasília: Mapa/ACS, 2009.

MENDES, K. F.; MASET, B. A.; MIELKE, K. C.; SOUSA, R. N.; MARTINS, B. A. B.; TORNISIELO, V. L. Phytoremediation of quinclorac and tebuthiuron-polluted soil by green manure plants. **International Journal of Phytoremediation**, 23(5), 474–481, 2020.

MENDES, K. F.; REIS, F. C.; DIAS, A. C. R.; TORNISIELO, V. L. Environmental impacts of pesticide use in agricultural systems. **Environmental Pollution**, v. 268, p. 115–123, 2021.

MÓZNER, Z.; TABI, A.; CSUTORA, M. Modifying the yield factor based on more efficient use of fertilizer - The environmental impacts of intensive and extensive agricultural practices. **Ecological Indicators**, v. 16, p. 58–66, 2012.

NANTES, L. S.; ARAGÃO, M. B.; MOREIRA, B. R. A.; FRIAS, Y. A.; VALÉRIO, T. S.; LIMA, E. W.; VIANA, R. S.; LOPES, P. R. M. Sinergismo e antagonismo no comportamento ambiental de tebuthiuron e tiamethoxam em solo com vinasse por atenuação natural. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 19, 2022.

NI, H.; LIU, Y.; CHEN, J.; ZHANG, X.; WANG, Q. Pesticide residues in agricultural soils: Distribution, risks and management strategies. **Science of the Total Environment**, v. 905, p. 167–180, 2025.

OLIVEIRA, A. A. S.; VIEIRA, L. C.; DREOSSI, S. C.; DORTA, D. J.; GRAVATO, C.; FERREIRA, M. E. S.; OLIVEIRA, D. P. Integrando abordagens morfológicas, bioquímicas, comportamentais e moleculares para investigar a toxicidade do desenvolvimento desencadeada pelo tebuthiuron em peixe-zebra (*Danio rerio*). **Chemosphere**, Oxford, v. 340, p. 139894, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139894>.

PÉREZ-LUCAS, G.; VIVAS, A.; NAVARRO, S.; FENOLL, J. Environmental risk of groundwater pollution by pesticide leaching through the soil profile. **Chemosphere**, v. 215, p. 679–691, 2019.

PROVENTIS LIFESCIENCE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS LTDA. **Combine 500 SC: bula completa**. Disponível em: Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários (AGROFIT), Ministério da Agricultura e Pecuária. Acesso em: 2 mar. 2026.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2023.

RIBAS, P. M. **Sorgo: aspectos agronômicos e fisiológicos**. Embrapa, 2008.

SABZEVARI, S.; HOFMAN, J. Spatial variability and uncertainty in pesticide contamination of soils: A global perspective. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127–141, 2022.

SANTOS, E. F.; MORAES, L. A.; COSTA, M. A.; NOGUEIRA, A. R. Bioensaios ecotoxicológicos como ferramenta integrada na avaliação de impactos de pesticidas no solo. **Chemosphere**, v. 342, p. 140210, 2025

SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A; OLIVEIRA, J. B; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 6.ed. rev. ampli. Brasília, DF: Embrapa. 396 p., 2018.

SILVA, D. P.; VIVEIROS, J.; JACOMASSI, L. M.; PACOLA, M.; MOMESSO, L.; SIQUEIRA, G. F.; MARTELO, J. M.; FOLTRAN, R.; SORATTO, R. P.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; CRUSCIOL, C. A. C. Efeitos do inseticida tiametoxam no crescimento de plantas de cana-de-açúcar sob maturação química na colheita precoce e tardia. **Ciência das Plantas**, [s.l.], 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40599756/>.

SILVA, J. R.; OLIVEIRA, A. L.; PEREIRA, M. G.; FERREIRA, E. A. Critérios para seleção de organismos bioindicadores em ensaios ecotoxicológicos. **Revista Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 22, p. 45–56, 2012.

SINGH, R.; SHARMA, A. K.; MEENA, V. S.; YADAV, G. S. Biofertilizers: role in sustainable agriculture and plant growth promotion. **Agronomy Journal**, v. 7, n. 11, p. 1–12, 2024.

SOBRERO, M. C.; RONCO, A. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). In: MORALES, G. C. (ed). **Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas: standerización, intercalibración, resultados y aplicaciones**. Mexico: IMTA, p. 71-79, 2004.

SYNGENTA PROTEÇÃO DE CULTIVOS LTDA. **Actara 250 WG: bula completa**. Disponível em: Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários (AGROFIT), Ministério da Agricultura e Pecuária. Acesso em: 2 mar. 2026.

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

TANG, F. H. M.; LENZEN, M.; MCBRATNEY, A.; MAGGI, F. Risk of pesticide pollution at the global scale. **Nature Geoscience**, v. 14, p. 206–210, 2021.

TAVARES, L. C.; RIBEIRO, G. H.; ROSA, D. P.; MENEGHELLO, G. E. Tratamento de sementes com thiamethoxam e seus efeitos no crescimento inicial de plantas. **Científica**, Jaboticabal, v. 44, n. 3, p. 321–329, 2016.

TEIXEIRA, M. M.; AGUIAR, G. R.; SILVA, J. M.; SILVA, K. T. M.; SIEBENEICHLER, S. C.; JÚNIOR, O. J. F.; LIMA, C. S. L.; BASTOS, I. M. A. S.; SOUSA, A. S.; OLIVEIRA, M. Photosystem II inhibitor herbicides. **Observatory of the Latin American Economy**, v. 22, n. 7, e5856, 2024.

THOMAS, M. C.; FLORES, F.; KASERZON, S.; REEKS, T. A.; NEGRI, A. P.

Toxicidade dos herbicidas diuron, propestina, tebuthiuron e haloxifo para a diatomácea *Chaetoceros muelleri*. **Relatórios Científicos**, Londres, v. 10, p. 19592, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76592-4>.

TYGEL, A.; GURGEL, A. M.; HOINKES, C.; CHEMNITZ, C.; GOULSON, D.; MALDONADO, E.; DE CASTRO, F. P.; BUTSCHER-SCHADEN, H.; ZALLER, J.;

SOUZA, J.; DOLCE, J.; SANTORUM, J. A.; WENZ, K.; BOMBARDI, L.; MELGAREJO, L.; BESERRA, L.; DE FREITAS, L. M.; SOARES, M. R.; MERTENS, M.; PITTELKOW, N.; RIBEIRO, S.; BOLLMOHR, S.; HAFFMAN, S.; BÖDEKER, W. **Atlas de pesticidas: fatos e dados sobre o uso dessas substâncias na agricultura**. 2024. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2023/12/01/atlas-dos-agrotoxicos>. Acesso em: 26 nov. 2025.

VALÉRIO, T. S. **Ecotoxicidade de solos com tebuthiuron associado a inoculantes microbianos e cultivo de mucuna-cinza ou feijão-de-porco**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Universidade Estadual Paulista, Dracena, 2023.

VESSEY, J. K. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. **Plant and Soil**, v. 255, p. 571–586, 2003.

VILLAVERDE, J.; RUBIO-BELLIDO, M.; MERCHAN, F.; MORILLO, E. Bioremediation of diuron contaminated soils by a novel degrading microbial consortium. **Journal of Environmental Management**, London, v. 188, p. 379- 386, 2018.

WAN, Y.; WANG, Y.; ZHANG, J.; ZHOU, Q.; LI, X. Long-term ecological effects of pesticide exposure on non-target organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 264, p. 115–128, 2025.

WEI, Z.; LE, Q. V.; PENG, W.; YANG, Y.; YANG, H.; GU, H.; LAM, S. S.; SONNE, C. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, p. 123658, 2021.

WU, Q.; ZHOU, H.; TAM, N. F. Y.; TIAN, Y.; TAN, Y.; ZHOU, S.; LI, Q.; CHEN, Y.; LEUNG, J. Y. S. Contamination, toxicity and speciation of heavy metals in an industrialized urban river: implications for the dispersal of heavy metals. **Environmental Pollution**, v. 214, p. 738–746, 2016.

YI, X.; ZHAO, Y.; LIU, H.; SUN, J.; WANG, L. Human health risks associated with pesticide contamination in agricultural soils. **Environmental Research**, v. 238, p. 117–129, 2024.


YUAN, T.; WAN, D.; YANG, W.; GU, J.; ZHOU, H.; ZENG, P LIAO, B. O ácido tartárico combinado com gibelina melhora a eficiência da remediação e garante a produção segura de culturas: Uma nova estratégia para fitorremediação. **Ciência do Meio**

Ambiente Total, v. 908, p. 168319, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.168319>.

ZHANG, H.; YUAN, X.; XIONG, T.; WANG, H.; JIANG, L. Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: influence factors, mechanisms and evaluation methods. **Chemical Engineering Journal**, v. 398, p. 125657, 2020.

ZORTÉA, T.; SEGAT, J. C.; MACCARI, A. P.; SOUSA, J. P.; SILVA, A. S.; BARETTA, D. Toxicidade de quatro medicamentos veterinários sobre a sobrevivência e reprodução de *Folsomia candida* em solos tropicais. **Quimosfera**, v. 173, p. 460-465, 2017.

**ASSOCIAÇÃO DE *Sorghum bicolor* E BIOFERTILIZANTE NA
BIORREMEDIAÇÃO DE SOLO COM TEBUTHIURON E THIAMETHOXAM**



Thalia S. Valério

Thalia Silva Valério
(aluna)



Paulo Renato Matos Lopes

Paulo Renato Matos Lopes
(orientador)

Ilha Solteira - SP

2026
