

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Ana Laura Biassi Orlandi

**RESPOSTAS ECOTOXICOLÓGICAS DE LEGUMINOSAS
COM A PRESENÇA DO HERBICIDA INDAZIFLAM NO SOLO**

Dracena

2026

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
CAMPUS DE DRACENA**

Ana Laura Biassi Orlandi

**RESPOSTAS ECOTOXICOLÓGICAS DE LEGUMINOSAS
COM A PRESENÇA DO HERBICIDA INDAZIFLAM NO SOLO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Ciências
Agrárias e Tecnológicas – Unesp, Câmpus de
Dracena como parte das exigências para
conclusão de curso em Engenharia
Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Renato Matos Lopes

Co-orientador: Paulo Henrique Frata Ferreira

Dracena

2026



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Dracena



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
UNESP – CÂMPUS DE DRACENA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Respostas ecotoxicológicas em solo com o herbicida indaziflam pela presença de leguminosas

Modalidade: Trabalho de **Atividades de pesquisa**

Autor: Ana Laura Biassi Orlandi

Orientador: Paulo Renato Matos Lopes

Co-orientador: Paulo Henrique Frata Ferreira

Número de Créditos: 12

Data da aprovação e correção de acordo com as sugestões da Banca: 09/06/2026



Documento assinado digitalmente
PAULO RENATO MATOS LOPES
Data: 09/06/2026 16:33:39-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>



Documento assinado digitalmente
RONALDO CINTRA LIMA
Data: 10/06/2026 08:07:38-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>



Documento assinado digitalmente
YANCA ARAUJO FRIAS
Data: 09/06/2026 16:47:00-0300
Verifique em <https://validar.jb.gov.br>

Paulo Renato Matos
Lopes

Ronaldo Cintra Lima

Yanca Araujo Frias

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu pai Alessandro Ambrosio Orlandi e à minha mãe, Daniele Bocchi Biassi, por terem me proporcionado toda educação e me ensinarem sobre o que realmente importa na vida, sendo minha base em todos os momentos e me mostrando o caminho do bem, e à minha irmã, Ana Clara Biassi Orlandi, por ser minha parceira e companheira em cada passo das caminhadas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e apoio financeiro do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

Agradeço ao Grupo Núcleo de Estudo Tecnologia de Aplicação (NETA) da Unesp – Dracena, liderado pelo Prof. Dr. Evandro Pereira Prado, por nos permitir o acesso e fornecer os equipamentos necessários em seu laboratório para a aplicação do herbicida.

Sou grata à Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas (FCAT/Unesp – Brasil) pelo apoio institucional e pela formação sólida e qualificada que me proporcionou ao longo desses cinco anos, contribuindo de forma significativa para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Também agradeço aos técnicos de laboratório e de campo pelo auxílio durante a condução do experimento, cuja colaboração foi essencial para a sua execução.

Expresso meu sincero agradecimento ao Prof. Dr. Paulo Renato Matos Lopes, pela orientação dedicada, paciência e compreensão ao longo deste trabalho, sempre esclarecendo dúvidas, indicando caminhos e tornando mais leves os desafios encontrados durante a pesquisa. Sou imensamente grata pelo respeito, apoio, confiança e parceria, e considero uma honra ter sido sua orientanda na graduação, tendo em sua trajetória uma grande inspiração acadêmica e profissional. Por fim, agradeço ao Grupo Ação em Impactos Ambientais (GAIA) pela acolhida na minha jornada acadêmica e pelo suporte que possibilitou a realização deste projeto.

Agradeço ao Paulo Henrique Frata Ferreira pelo apoio fundamental na compreensão dos elementos deste trabalho, contribuindo de forma significativa nas análises e revisões realizadas. Seu comprometimento, dedicação e disponibilidade foram indispensáveis para a concretização deste trabalho.

Dedico minha mais profunda gratidão aos meus pais, Alessandro Ambrosio Orlandi e Daniele Bocchi Biassi, que sempre investiram na minha educação e me ensinaram, pelo exemplo, a perseguir meus sonhos com honestidade e perseverança. Sou grata pelo amor incondicional, pelos ensinamentos sobre responsabilidade, respeito e dignidade, e pela força com que enfrentam a vida.

Estendo também meu reconhecimento e carinho à minha irmã, Ana Clara Biassi Orlandi, e toda a minha família. Sinto-me abençoada por Deus por ter uma

família tão especial, que me apoia, acredita em meu potencial e celebra cada uma das minhas conquistas como se fossem suas.

Sou grata à minha namorada, Malu Pinto Alves, por ter sido meu porto seguro ao longo desta caminhada. Em meio às incertezas, pressões e desafios do curso, sua presença constante trouxe equilíbrio, serenidade e motivação para seguir em frente. Ao seu lado, compreendi como se constrói o amor verdadeiro, no apoio silencioso e na coragem compartilhada diante das dificuldades.

Aprecio a República Pé Preto, que se tornou minha segunda casa ao longo dessa caminhada, oferecendo acolhimento, apoio e companheirismo em diversos momentos.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos, que estiveram presentes ao longo dessa trajetória, compartilhando momentos, apoiando nos desafios e celebrando cada conquista. A amizade de cada um tornou essa caminhada mais leve, alegre e significativa.

“Combati o bom combate, terminei a corrida, guardei a fé. Ao longo dessa jornada, enfrentei desafios, superei limites e cresci em cada etapa, aprendendo que a perseverança, a fé e a dedicação transformam esforço em conquista e sonhos em realidade.”

(2 Timóteo 4:7)

RESUMO

O uso contínuo de herbicidas residuais em sistemas agrícolas pode comprometer o desenvolvimento de culturas subsequentes e alterar processos biológicos do solo. Entre esses compostos, o indaziflam destaca-se pela elevada persistência ambiental, tornando necessária a busca por alternativas que reduzam seus impactos em áreas agrícolas. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar as respostas fisiológicas de diferentes espécies de leguminosas cultivadas em solo contendo indaziflam, visando identificar espécies com maior tolerância ao herbicida e potencial de utilização em estratégias de recuperação de áreas contaminadas. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×5 , composto por solo com e sem aplicação do herbicida e cinco espécies de leguminosas: amendoim, feijão-de-porco, crotalária, mucuna-cinza e soja. Foram avaliados índice de velocidade de germinação, porcentagem de germinação, comprimento de hipocótilo e raiz, biomassa total e respostas ecotoxicológicas do solo. A presença do indaziflam promoveu redução significativa na germinação e no desenvolvimento inicial das espécies avaliadas. Nos tratamentos sem herbicida, todas as culturas apresentaram germinação superior a 92%, enquanto na presença do indaziflam a mucuna-cinza apresentou a maior porcentagem de germinação (23,33%) e maior índice de velocidade de germinação. Em contrapartida, crotalária e amendoim apresentaram ausência total de germinação em solo contaminado. O comprimento radicular também foi afetado pelo herbicida, sendo observada redução do desenvolvimento das plântulas nas espécies sensíveis. Além disso, a biomassa total foi reduzida nos tratamentos com indaziflam, com menor valor observado para mucuna-cinza. Os resultados evidenciaram respostas distintas entre as espécies avaliadas, indicando maior tolerância de mucuna-cinza e feijão-de-porco à presença do herbicida no solo. Dessa forma, essas espécies demonstraram um possível potencial para utilização em programas de fitorremediação e manejo sustentável de áreas agrícolas.

Palavras-chave: Bioensaios ecotoxicológicos. Efeito residual. Estratégias sustentáveis. Fitorremediação. Fitotoxicidade.

ABSTRACT

The continuous use of residual herbicides in agricultural systems may compromise the development of subsequent crops and alter biological processes in the soil. Among these compounds, indaziflam stands out due to its high environmental persistence, making it necessary to seek alternatives capable of reducing its impacts on agricultural areas. In this context, the present study aimed to evaluate the physiological responses of different legume species cultivated in soil containing indaziflam, seeking to identify species with greater tolerance to the herbicide and potential use in strategies for the recovery of contaminated areas. The experiment was conducted in a completely randomized design, in a 2 × 5 factorial scheme, consisting of soil with and without herbicide application and five legume species: peanut, jack bean, sunn hemp, velvet bean, and soybean. Germination speed index, germination percentage, hypocotyl and root length, total biomass, and soil ecotoxicological responses were evaluated. The presence of indaziflam significantly reduced germination and initial development of the evaluated species. In treatments without herbicide, all crops showed germination rates above 92%, whereas in the presence of indaziflam, velvet bean presented the highest germination percentage (23.33%) and the highest germination speed index. In contrast, sunn hemp and peanut showed complete absence of germination in contaminated soil. Root length was also affected by the herbicide, with reduced seedling development observed in sensitive species. In addition, total biomass was reduced in treatments containing indaziflam, with the lowest value observed for velvet bean. The results demonstrated distinct responses among the evaluated species, indicating greater tolerance of velvet bean and jack bean to the presence of the herbicide in the soil. Thus, these species demonstrated potential for use in phytoremediation programs and the sustainable management of agricultural areas.

Keywords: Ecotoxicological bioassays. Phytoremediation. Phytotoxicity. Residual effect. Sustainable strategies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aplicação do herbicida indaziflam pelo pulverizador laboratorial automático.....	23
Figura 2: Delineamento experimental com o cronograma de etapas.....	24
Figura 3: Escala para identificação e quantificação de sintomas de fitotoxicidade na soja (<i>Glycine max</i> L.).....	25
Figura 4: Preparo dos bioensaios de ecotoxicidade a partir do (A) solubilizado das amostras de solo e das (B) sementes de alface como organismos-teste.....	26
Figura 5: Diagrama das etapas de preparo dos bioensaios ecotoxicológicos.....	27
Figura 6: Planta de feijão-de-porco sem fitotoxicidade visual em solo com indaziflam aos 21 DAS.....	29
Figura 7: Índice de velocidade de germinação (IVG) do organismo-teste em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.....	31
Figura 8: Porcentagem de germinação (%G) do organismo-teste em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.....	33
Figura 9: Comprimento do hipocótilo das plântulas do organismo-teste em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.....	35
Figura 10: Desenvolvimento da raiz das plântulas do organismo-teste em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.....	37
Figura 11: Biomassa total do organismo-teste em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	O indaziflam no solo	15
3.2	Uso de leguminosas na fitorremediação	16
3.2.1	Amendoim	17
3.2.2	Feijão-de-porco	17
3.2.3	Crotalária	17
3.2.4	Mucuna-cinza	18
3.2.5	Soja	18
3.2.6	Bioensaios ecotoxicológicos	19
4	MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1	Solo, indaziflam e espécies vegetais	21
4.2	Desenho experimental e aplicação do herbicida	22
4.3	Semeadura	23
4.4	Fitotoxicidade segundo escala visual	25
4.5	Bioensaios ecotoxicológicos	25
4.6	Análise de dados	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	Fitotoxicidade	29
5.2	Bioensaios ecotoxicológicos	30
5.2.1	Germinação de sementes	30
5.2.2	Desenvolvimento de hipocótilo e raiz	34
5.2.3	Biomassa total	38

6	CONCLUSÃO	40
----------	------------------------	-----------

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o país que mais consome agrotóxicos e sua utilização está intimamente relacionada com o aumento da produtividade das lavouras. Entre os produtos, os herbicidas são os mais utilizados, seguido por inseticidas e fungicidas (BRESSIANI et al., 2023).

Dentre os herbicidas utilizados no Brasil, o indaziflam (*N-[(1R,2S)-2,3-dihydro-2,6-dimethyl-1H-inden-1-yl]-6-[(1R)-1-fluoroethyl]-1,3,5-triazine-2,4-diamine*) trata-se um ingrediente ativo pertencente à nova classe química das alquilazinas. Seu mecanismo de ação está na inibição da biossíntese de celulose, podendo controlar tanto monocotiledôneas quanto dicotiledôneas, em pré ou pós-emergência inicial (AMIM et al., 2014).

Sejam eles aplicados diretamente no solo ou na parte aérea das plantas, o solo é o destino final destes produtos químicos usados na agricultura. E, ao entrarem em contato com o solo, os agrotóxicos estão sujeitos a processos físico-químicos que regulam seu comportamento ambiental e efeito residual (MANCUSO, 2011).

Assim, a preocupação com a degradação, contaminação e poluição de agroecossistemas por atividades antrópicas tem aumentado proporcionalmente ao maior uso de insumos agrícolas. O solo é capaz de absorver grandes quantidades de contaminantes sem sofrer grandes transformações, entretanto alterações podem se tornar irreversíveis e os danos causados ao meio ambiente de difícil recuperação (STEFFEN et al., 2011).

Dentro da biorremediação insere-se a fitorremediação, que envolve o emprego de plantas, sua microbiota associada e de amenizantes (corretivos, fertilizantes, matéria orgânica etc.) do solo, além de práticas agronômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema (ACCIOLY et al., 2000). Neste contexto, a fitorremediação é uma técnica que objetiva a descontaminação de solo e água, utilizando plantas como agente de tratamento. Esta técnica representa uma alternativa aos métodos físicos e químicos convencionais, sendo vantajosa principalmente pelo potencial *in situ*, maior apelo sustentável e ser economicamente viável. Além disso, existem diferentes espécies vegetais que podem ser empregadas em ambientes contaminados tanto por substâncias inorgânicas quanto orgânicas (PIRES, 2003).

Logo, o emprego de leguminosas da família *Fabaceae* em cenários de fitorremediação torna-se interessante, visto que apresentam elevado potencial para fixar o nitrogênio atmosférico em simbiose com as bactérias diazotróficas, além de serem promissoras para o sequestro de carbono em solos agrícolas. Logo, o cultivo destas plantas potencialmente fitorremediadoras em solos agrícolas com agrotóxicos constitui uma alternativa para melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produção agrícola sustentável (RUGANA IMBANA et al., 2021).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o potencial de diferentes leguminosas na mitigação dos efeitos residuais do indaziflam no solo.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar os níveis de fitotoxicidade provocados pelo indaziflam nas diferentes culturas; e
- Avaliar as respostas ecotoxicológicas do solo utilizando alface como organismo-teste.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. O indaziflam no solo

O indaziflam é um herbicida de nova geração, desenvolvido para o controle de gramíneas daninhas resistentes e introduzido no Brasil em 2016. Inicialmente, foi concebido para atender à demanda por soluções mais eficientes e de longa duração, proporcionando controle eficaz de plantas daninhas em culturas como soja, milho e gramados (*turfgrass*). Sua introdução representou um avanço em relação aos herbicidas tradicionais, especialmente devido ao seu efeito residual prolongado e à alta eficácia em aplicações em pré-emergência (TOMPKINS, 2010).

A aplicação do indaziflam é uma forma de manejo de plantas daninhas de cana-de-açúcar (FURLAN, 2020). Estudos demonstraram que, em aplicações pré-emergência, o controle de capim-colchão-liso (*Digitaria ischaemum*) atingiu 91–94% aos 195 dias após a aplicação (DAA), e o de capim-colchão (*Digitaria sanguinalis*) foi superior a 90% aos 203 DAA (PERRY et al., 2011). Esses resultados evidenciam sua eficiência prolongada e reforçam o interesse por pesquisas sobre seu comportamento em diferentes sistemas de cultivo.

Quanto às propriedades físico-químicas, o indaziflam apresenta baixa solubilidade em água ($0,0028 \text{ kg m}^{-3}$ a 20°C), log Kow de 2,8, pKa de 3,5 e Koc inferior a 1.000 mL g^{-1} de carbono orgânico (ALONSO et al., 2011; VIVIAN et al., 2007). Essas características indicam mobilidade moderada a baixa, com tendência à sorção em matéria orgânica do solo (MOS), principal sítio de retenção de compostos pouco solúveis em água. A complexidade dessas interações, envolvendo absorção pelas plantas, lixiviação e ligação aos coloides, dificulta a previsão exata do destino do herbicida no ambiente (AMIM et al., 2014).

O indaziflam apresenta meia-vida no solo superior a 150 dias, sendo classificado como herbicida residual de longa duração. Essa característica confere maior flexibilidade na aplicação, porém também eleva o potencial de impacto ambiental, especialmente em solos submetidos ao uso intensivo de herbicidas. Sua persistência no ambiente pode comprometer o desenvolvimento de culturas subsequentes e afetar a qualidade do ecossistema, o que reforça a necessidade da adoção de estratégias sustentáveis de manejo (TOMPKINS, 2010).

Diante do exposto, a literatura aponta para a relevância de alternativas que possam mitigar a presença residual de herbicidas no solo. Nesse contexto, espécies

vegetais com potencial fitorremediador, como as leguminosas, têm sido estudadas por sua capacidade de interagir com a microbiota do solo, estimular processos biológicos e auxiliar na degradação ou imobilização de resíduos químicos (HOU; AL-TABBAA, 2014; SOUZA, 2007).

3.2. Uso de leguminosas na fitorremediação

A busca por alternativas para a descontaminação de ambientes e/ou mitigar os efeitos negativos de compostos tóxicos tornou-se uma das importantes preocupações científicas com o intuito de remediar os impactos das atividades antrópicas no planeta. Apesar de todos os esforços nos últimos anos, ainda não existe uma tecnologia perfeita para a descontaminação (CAMESELLE et al., 2013).

Entre os processos de tratamento, uma técnica que se destaca pelas menores consequências adversas é a fitorremediação, cujo processo sustentável visa a minimização dos impactos pelo uso de plantas capazes de absorver, degradar e/ou favorecer a redução de seus prejuízos no meio ambiente (HOU e AL-TABBAA, 2014).

Neste sentido, as leguminosas constituem um grupo de plantas de elevado potencial para utilização na fitorremediação, pois são capazes de interferir no ciclo do nitrogênio devido à sua interação com bactérias fixadoras presentes no solo, as quais possuem a capacidade de fixar o nitrogênio molecular. Além disso, essas espécies apresentam sistema radicular eficiente, estimulam a microbiota do solo e possuem elevada capacidade de produção de biomassa. Dessa forma, sua utilização contribui para a redução do uso de adubos nitrogenados nas culturas, sem prejuízos ao crescimento e desenvolvimento das plantas (SOUZA, 2007).

Essas características tornam sua aplicação especialmente relevante em áreas submetidas ao uso intensivo de insumos agrícolas, onde a utilização frequente de herbicidas pode resultar na persistência desses compostos no solo, comprometendo o desenvolvimento das culturas subsequentes e gerando impactos ambientais significativos.

Embora o potencial fitorremediador dessas espécies seja amplamente reconhecido, ainda são limitadas as informações sobre sua eficiência em diferentes condições edafoclimáticas e frente a distintas classes de herbicidas, evidenciando a necessidade de estudos que aprofundem a compreensão desses processos e contribuam para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis no manejo de áreas agrícolas impactadas.

3.2.1. Amendoim

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma das principais plantas oleaginosas do mundo, cultivada em grande parte das regiões tropicais e ocupando o quinto lugar na produção mundial (USDA, 2017). A espécie é adaptável a diferentes tipos de solo, que frequentemente sofrem impactos decorrentes do uso intensivo de insumos agrícolas, incluindo herbicidas residuais como o indaziflam (LI e BOUFADEL, 2010).

Como membro da família Fabaceae, o amendoim possui elevada capacidade de fixação biológica de nitrogênio, produz biomassa significativa e contribui para a melhoria da fertilidade e estrutura do solo (ABADYA et al., 2019). O aumento do cultivo de amendoim por meio da sucessão de culturas, principalmente em áreas canavieiras, tem se destacado como principal fator para o aumento da produção nacional. Essa sucessão de cana-de-açúcar e amendoim é uma prática comum e uma alternativa para os produtores obterem renda extra, principalmente por auxiliar na recuperação de solos impactados e na fixação de nitrogênio (FURLAN, 2020).

3.2.2. Feijão-de-porco

O feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) é uma leguminosa rústica, tolerante a altas temperaturas, seca e sombreamento parcial, capaz de se adaptar a solos pobres em fósforo e cultivável em regiões livres de geadas (TEIXEIRA et al., 2010). Sua ampla adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas permite que seja incluída em sistemas de rotação de culturas, contribuindo para a proteção e cobertura do solo.

Além disso, apresenta elevada fixação biológica de nitrogênio, enriquecendo naturalmente a fertilidade do solo e promovendo o equilíbrio de nutrientes em áreas impactadas por herbicidas (TOEBE, 2012). O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil está apto a receber outros cultivos nas áreas de reforma do canavial, o cultivo do feijão-de-porco nessa prática, pode reduzir a erosão, estimular a microbiota do solo e auxiliar na mitigação dos efeitos residuais de produtos químicos, sendo uma estratégia sustentável de manejo (SILVEIRA et al., 2019).

3.2.3. Crotalária

A crotalária (*Crotalaria ochroleuca* L.) é uma leguminosa tropical com rápido crescimento, elevada produção de biomassa e significativa fixação biológica de nitrogênio (FBN), utilizada como adubo verde ou cobertura do solo (ANTONIO, 2012). Sua capacidade de supressão de ervas daninhas e de melhoria da qualidade do solo a torna adequada para sistemas agrícolas impactados por herbicidas persistentes.

Porém, a sensibilidade ao fotoperíodo exige adequação das épocas de semeadura e arranjos populacionais, de forma a otimizar o desempenho da cultura e minimizar competição entre plantas (URQUIAGA, 2005).

A utilização da crotalária nas áreas de canavial pode contribuir para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, verificaram que as culturas rotativas contribuem com resíduos orgânicos, mas em geral, não são suficientes para causar mudanças significativas na matéria orgânica do solo em curto prazo. No entanto, ao utilizarem a crotalária é possível identificar um aumento de 30% na produtividade no canavial (PEREIRA et al., 2017).

3.2.4. Mucuna-cinza

A mucuna-cinza (*Mucuna pruriens* L. DC.) é utilizada como cobertura e proteção do solo, destacando-se pelo elevado acúmulo de carbono orgânico, especialmente quando cultivada em consórcios com milho e em sistemas de preparo reduzido do solo (CARGNELUTTI, 2014). A espécie apresenta também elevada fixação biológica de nitrogênio e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, favorecendo o enriquecimento e recuperação de solos degradados (CARGNELUTTI, 2012).

A utilização das diversas espécies de mucuna em rotação com canaviais, é uma alternativa para o suprimento parcial ou total de N. Além do suprimento de N, essas espécies podem determinar aumento no rendimento na cultura da cana-de-açúcar, considerando a manutenção da umidade do solo, a diminuição das temperaturas máximas, da amplitude térmica e a reciclagem de nutrientes como P, K, Ca, Mg e S (DUARTE JÚNIOR et al., 2008).

3.2.5. Soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura de grande importância econômica global, utilizada para produção de óleo vegetal, ração animal, indústria de alimentos e química, além de recente interesse como fonte de biocombustível (COSTA NETO e ROSSI, 2000). A espécie apresenta alta plasticidade, ajustando morfologia e componentes de rendimento às condições ambientais e ao arranjo populacional das plantas (CRUZ, 2016).

Além de seu valor econômico, a soja pode contribuir para sistemas de rotação e cobertura. A produção de soja em sistemas de rotação com cana-de-açúcar pode ser uma forma de rotação de cultura com benefícios econômicos, pela produção de grãos nesse intervalo, ao invés do pousio, ambientais, pois pode ser uma forma de

fornecer N proveniente de fixação biológica ao solo, e sociais, devido a gerar mais uma alternativa de renda ao produtor no período de reforma (FUJIHARA et al., 2015).

3.2.6. Bioensaios ecotoxicológicos

Os bioensaios ecotoxicológicos constituem ferramentas amplamente utilizadas para avaliar os efeitos de contaminantes sobre organismos vivos, permitindo a identificação de impactos ambientais decorrentes da presença de substâncias potencialmente tóxicas no solo, na água e nos sedimentos. Em estudos com plantas, parâmetros como porcentagem de germinação, índice de velocidade de germinação, comprimento radicular e desenvolvimento inicial das plântulas são frequentemente empregados como indicadores da toxicidade ambiental. Devido à elevada sensibilidade das plantas aos contaminantes, esses organismos são considerados excelentes bioindicadores para a avaliação da qualidade ambiental. Santos et al. (2025) destacam que bioensaios baseados na germinação de sementes e no crescimento inicial de plantas são métodos eficientes para o monitoramento ecotoxicológico, possibilitando detectar efeitos adversos causados por resíduos e efluentes mesmo em baixas concentrações. Dessa forma, os bioensaios ecotoxicológicos representam uma importante ferramenta na investigação dos riscos ambientais associados à contaminação de ecossistemas agrícolas.

Diante do que foi apresentado, observa-se que o indaziflam é um herbicida residual de longa duração, capaz de permanecer ativo no solo por períodos prolongados, o que pode afetar o desenvolvimento de culturas subsequentes e impactar os processos biológicos do solo. Nesse contexto, estratégias que promovam a mitigação dos efeitos residuais desse herbicida são fundamentais para a sustentabilidade de sistemas agrícolas. As leguminosas, por suas características fisiológicas e agronômicas, surgem como uma alternativa promissora, oferecendo potencial para recuperação da fertilidade do solo, aumento da biomassa, estímulo à microbiota e fixação biológica de nitrogênio.

Com base nessas informações, é possível levantar a hipótese de que diferentes espécies de leguminosas podem apresentar distintos níveis de tolerância ao indaziflam e contribuir de forma variável para a recuperação de solos impactados. A investigação das respostas fisiológicas dessas culturas, incluindo germinação, crescimento inicial, índice de clorofila e fitotoxicidade, se mostra relevante para avaliar

seu potencial na fitorremediação e fornecer informações úteis para o manejo sustentável de áreas agrícolas submetidas ao uso intensivo de herbicidas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAT/UNESP, campus de Dracena, em uma estufa agrícola. O experimento ocorreu de setembro a dezembro de 2025, obtendo nesse período uma temperatura média de 26,01 °C e uma umidade relativa média do ar de 67,9% (EMA/FCAT- Estação Meteorológica de Dracena).

4.1. Solo, indaziflam e espécies vegetais

O solo utilizado foi o Latossolo Vermelho-Amarelo, que possui grande porcentagem de areia, coletado da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da FCAT (FEPE), sem histórico de aplicação de pesticida, sendo posteriormente peneirado e armazenado.

A análise química do solo foi realizada e apresentou os seguintes resultados: pH de 4,9 e teor de matéria orgânica de 7,0 gdm⁻³. Os teores de bases trocáveis foram de 1,3 mmolcdm⁻³ de potássio, 8,0 mmolcdm⁻³ de cálcio e 8,0 mmolcdm⁻³ de magnésio. O valor de hidrogênio + alumínio foi de 10,0 mmolcdm⁻³, enquanto o alumínio apresentou teor de 9,0 mmolcdm⁻³. O fósforo disponível foi de 2,0 mgdm⁻³. A soma de bases foi de 17,3 mmolcdm⁻³ e a capacidade de troca catiônica (CTC) apresentou valor de 27,3 mmolcdm⁻³. A saturação por bases foi de 63%, enquanto a saturação por alumínio foi de 34%.

Após essa análise, foi verificado que não era necessário fazer a calagem, pelo fato de o V% (saturação por bases) já estar em 63%, valor considerado adequado para o desenvolvimento da maioria das culturas, especialmente leguminosas. Apesar do pH ácido (4,9) e da presença de alumínio trocável, a proporção de bases no complexo de troca foi suficiente para garantir condições químicas favoráveis ao crescimento inicial das plantas. Assim, o manejo foi direcionado apenas à complementação nutricional, com a aplicação de fósforo e potássio, sendo aplicados 0,5 kg de superfosfato simples (18% de P₂O₅) e 0,5 kg de cloreto de potássio (60% de K₂O) em 1400kg de solo, visando suprir possíveis limitações desses nutrientes e favorecer o estabelecimento das culturas.

O herbicida utilizado foi o indaziflam (Alion®, 500 g i.a. L⁻¹, Bayer® S.A), que é sistêmico e seletivo do grupo das Alquilazinas, sendo aplicado conforme a bula do produto, com uma concentração de 500g/L.

As espécies vegetais utilizadas foram amendoim (*Arachis hypogaea* L.), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), crotalária (*Crotalaria ochroleuca* L.), mucuna-cinza (*Mucuna pruriens* L. DC.) e soja (*Glycine max* L.). As sementes utilizadas neste trabalho foram adquiridas da empresa BRSeeds®, exceto o amendoim (*Arachis hypogaea* L. - cultivar IAC OL3), que foram doadas pelo GEPESAS (Grupo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Sistemas Agrícolas Sustentáveis – FCAT/UNESP).

4.2. Desenho experimental e aplicação do herbicida

O experimento teve um delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial 2x5, de acordo com:

- (A) o herbicida indaziflam no solo, sendo a dose recomendada pela bula do produto comercial e testemunha sem aplicação, e
- (B) as cinco espécies vegetais de interesse agrícola na rotação da cultura canavieira.

Assim, foram realizados 10 tratamentos com sete repetições, em cinco tempos de avaliação, totalizando 350 unidades experimentais. Estas unidades foram representadas por vasos de 4,0 L preenchidos com o solo e para posterior pulverização do herbicida.

A aplicação do indaziflam foi realizada em local fechado por meio de um pulverizador automático em ambiente controlado do grupo de pesquisa NETA - Núcleo de Estudos em Tecnologia de Aplicação, FCAT/UNESP (Figura 1). O equipamento pressurizado por CO₂ possui com duas pontas de jato plano Magno ADGA-03 na pressão de 2 bar (vazão de 0,879 L min⁻¹), espaçadas em 0,5 m, na velocidade de 5 km h⁻¹, a uma altura de 0,90 m em relação ao topo dos vasos, proporcionando volume de aplicação de 211 L ha⁻¹.

Figura 1: Aplicação do herbicida indaziflam pelo pulverizador automático em ambiente controlado.



Fonte: Própria autora (2025).

4.3. Semeadura

Dez dias após a aplicação do herbicida, foi feita a semeadura de oito sementes de cada espécie de leguminosa por vaso. Os vasos foram irrigados diariamente com uma lâmina de água suficiente para a manutenção das condições adequadas para o desenvolvimento vegetal. Essa irrigação ocorreu 4 vezes ao dia com duração de 20 minutos cada. No vigésimo primeiro dia após a semeadura (21 DAS) ocorreu o desbaste, deixando apenas uma planta por vaso.

O experimento foi dividido em 5 tempos: 21, 28, 35, 42 e 49 DAS (Figura 2).

Figura 2: Delineamento experimental com o cronograma de etapas.

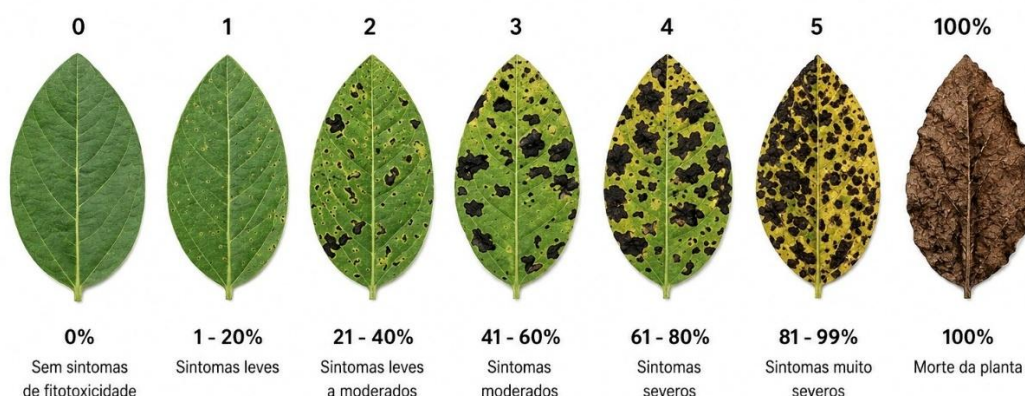


Fonte: Imagem elaborada pela autora com auxílio da ferramenta de inteligência artificial generativa NotebookLM (Google), a partir de prompt descritivo baseado na metodologia experimental do estudo. Acesso em: 24 maio 2026.

4.4. Fitotoxicidade segundo escala visual

A fitotoxicidade das plantas foi avaliada por meio de escala visual de injúria, conforme metodologia proposta pela Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD, 1995). As avaliações foram realizadas em cada tempo experimental mediante observação visual dos sintomas apresentados pelas plantas. A escala utilizada variou de 0 a 100%, em que: 0% = ausência de sintomas visuais de injúria; e 100% = morte das plantas (Figura 3).

Figura 3: Escala para identificação e quantificação de sintomas de fitotoxicidade na soja (*Glycine max* L.).



Fonte: Nascimento et al. (2018), adaptado com auxílio da ferramenta de inteligência artificial generativa NotebookLM (Google), a partir de prompt descritivo baseado na metodologia experimental do estudo. Acesso em: 20 junho 2026.

4.5. Bioensaios ecotoxicológicos

O monitoramento do potencial ecotoxicológico dos tratamentos foi realizado utilizando sementes de alface (*Lactuca sativa*) como organismo-teste no tempo final, ou seja, 49 DAS. Assim, foram preparadas seis replicatas a partir do extrato aquoso (solubilizado) do solo.

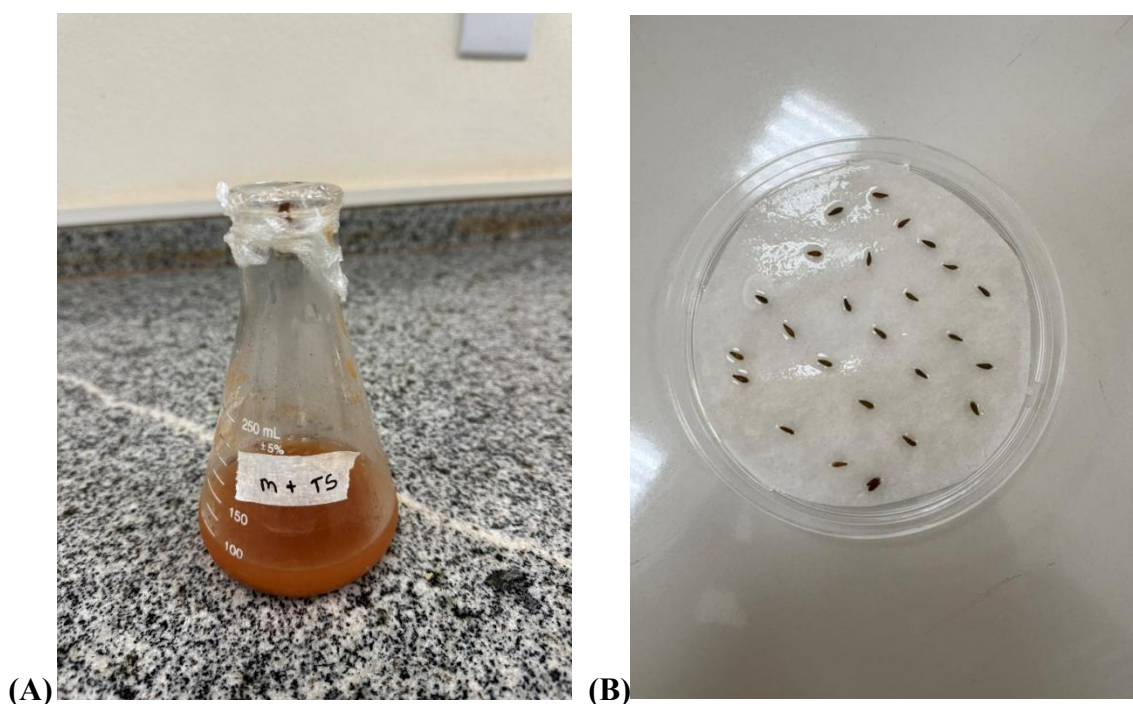
A metodologia baseou-se em Santos et al. (2025), com adaptações para as condições deste estudo. O solo foi coletado de todos os vasos de cada tratamento de forma equivalente em toda a proporção do vaso. Foi realizada a dissolução de 25 g de solo em 100 mL de água deionizada em frascos *Erlenmeyer* de 250 mL. Posteriormente, esses frascos foram lacrados com plástico filme de PVC, agitados por

cinco minutos em velocidade baixa (120 rpm) e incubadas em uma BOD sem iluminação interna a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ por 7 dias (Figura 4A).

Em seguida, foi realizada a aplicação de 3,0 mL do solubilizado em placas de Petri contendo papel filtro e 25 sementes de alface (Figura 4B). As placas foram envolvidas com plástico filme de PVC para evitar perda de umidade, e estas, posteriormente, incubadas em uma BOD, sem iluminação interna controlada, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ por 5 dias.

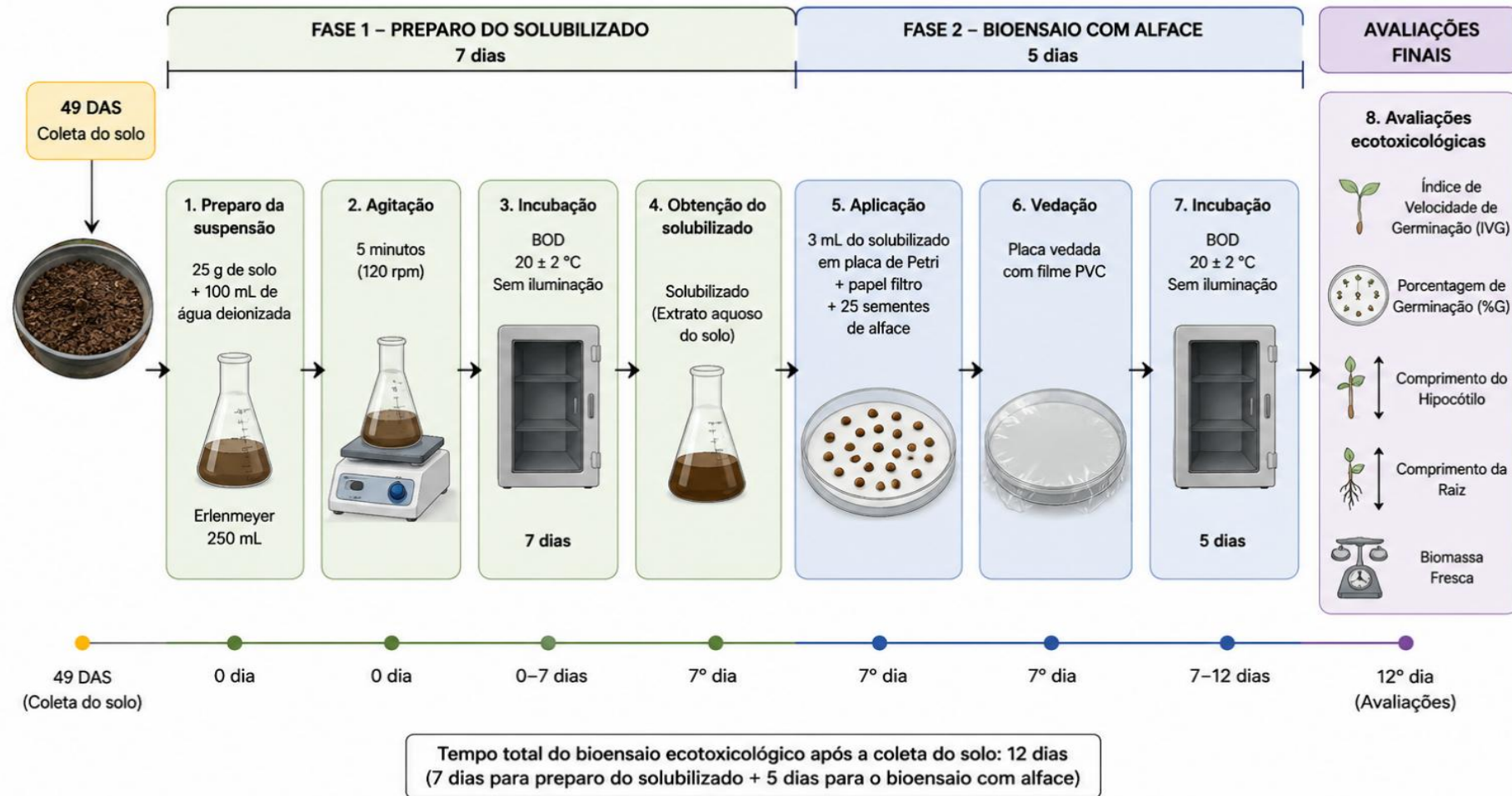
Por fim, foram analisadas as seguintes informações: velocidade da germinação das sementes, índice de germinação das sementes, peso da biomassa fresca e alongamento do hipocótilo e da raiz.

Figura 4: Preparo dos bioensaios de ecotoxicidade a partir do (A) solubilizado das amostras de solo e das (B) sementes de alface como organismos-teste.



Fonte: Própria autora (2026).

Figura 5: Diagrama das etapas de preparo dos bioensaios ecotoxicológicos.



Fonte: Imagem elaborada pela autora com auxílio da ferramenta de inteligência artificial generativa NotebookLM (Google), a partir de prompt descritivo baseado na metodologia experimental do estudo. Acesso em: 11 de junho de 2026.

4.6. Análise de dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (Tukey $p < 0,05$) para comparação das médias, quando o teste F foi significativo. Os cálculos foram realizados com auxílio dos pacotes scipy e statsmodels (Python 3.12), a partir do uso da ferramenta de inteligência artificial generativa Claude (Anthropic).

Além disso, a plataforma foi utilizada como suporte auxiliar na estruturação e revisão dos códigos estatísticos empregados nas análises, sem interferência na interpretação dos resultados. Assim, foram realizadas duas análises independentes: (1) comparando todos os tratamentos (IDZ- e IDZ+ de todas as culturas) e (2) comparando apenas os tratamentos com herbicida (IDZ+). Alguns resultados foram indicados por NI e NIM em função do número insuficiente de repetições e do número insuficiente por morte.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Fitotoxicidade

Nas plantas que conseguiram emergir, não foram observados sintomas visuais de fitotoxicidade ao longo do período experimental (Figura 6). Em todas as épocas de avaliação, notou-se 0% na escala de injúria, mostrando ausência total de manifestações típicas de fitotoxicidade como clorose, necrose, murcha, encarquilhamento foliar ou quaisquer alterações morfológicas visíveis.

Esses resultados indicam que o tratamento aplicado não promoveu efeitos notáveis a olho nu às plantas nas condições em que o experimento foi conduzido. Resultados semelhantes foram observados por outros autores, os quais verificaram predominância de notas nulas ao longo das avaliações, associando esse comportamento à ausência de danos visuais e à preservação do desenvolvimento vegetal (STOCO, 2025). Dessa forma, os resultados obtidos no presente estudo evidenciam sua viabilidade de uso sem causar prejuízos visuais às plantas nas condições avaliadas.

Figura 6: Planta de feijão-de-porco sem fitotoxicidade visual em solo com indaziflam aos 21 DAS.



Fonte: Própria autora (2025).

5.2. Bioensaios ecotoxicológicos

5.2.1. Germinação de sementes

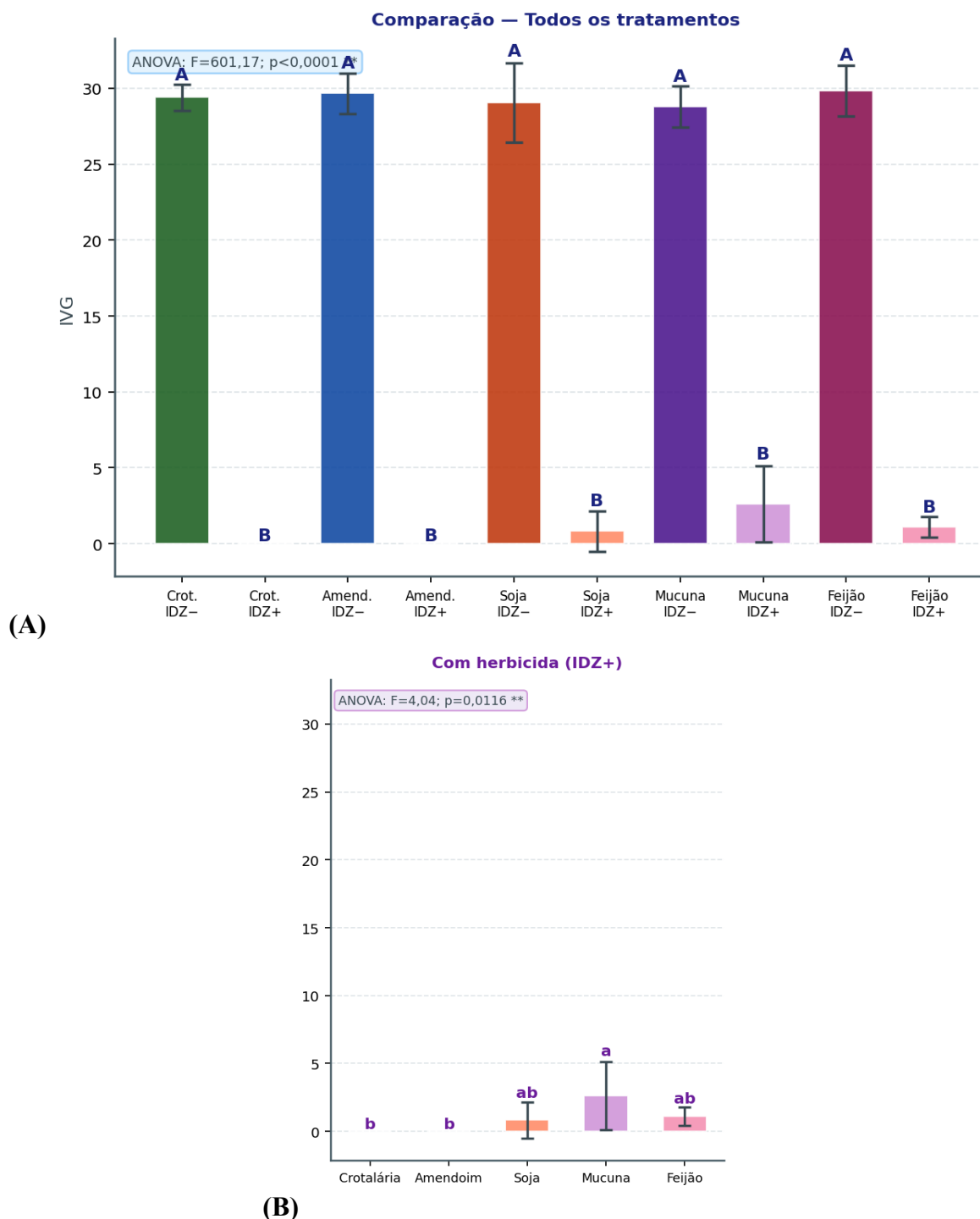
Pelo índice de velocidade de germinação, foi possível observar o efeito significativo da presença do indaziflam sobre a germinação do organismo-teste. Os tratamentos sem aplicação do herbicida (IDZ-) manifestaram os maiores valores de IVG e não diferiram estatisticamente entre si. Por outro lado, todos os tratamentos submetidos ao indaziflam (IDZ+) mostraram redução significativa na velocidade de germinação, diferindo dos respectivos controles (Figura 6A).

Com relação ao efeito das culturas conduzidas em solo contendo indaziflam (Figura 6B), a amostra cultivada com mucuna-cinza, promoveu maior IVG às sementes de alface entre os tratamentos com herbicida (2,625). Em contrapartida, solos com crotalária e amendoim apresentaram ausência total de germinação (IVG = 0,00). Já a presença de soja e feijão-de-porco tiveram comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente das outras espécies.

Estes resultados indicam que o indaziflam comprometeu significativamente o estabelecimento inicial do alface, reduzindo a velocidade de emergência das plântulas. Considerando que o IVG está diretamente relacionado ao vigor e à rapidez de ocupação do ambiente pelas plantas (SOMMER et al., 2024), a redução observada pode refletir interferências do herbicida em processos fisiológicos iniciais da germinação.

Dutra et al. (2023) também observaram que o indaziflam promoveu redução significativa na germinação de diferentes espécies vegetais (amendoim-bravo, angico-branco, canafístula, coração-de-negro, jatobá e monjoleiro), evidenciando respostas distintas de tolerância entre as culturas avaliadas. Os autores relataram que algumas espécies como angico-branco, coração-de-negro e canafístula apresentaram elevada sensibilidade ao herbicida, enquanto as outras mantiveram maior capacidade germinativa mesmo sob exposição ao indaziflam. Além disso, Pires et al. (2003) destacaram que espécies vegetais cultivadas em solo com presença de herbicidas podem apresentar diferentes níveis de tolerância ao contaminante, influenciando diretamente a germinação e o desenvolvimento inicial das plântulas.

Figura 7: Índice de velocidade de germinação (IVG) do organismo-teste (alface) em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.



Legenda: IDZ-/IDZ+ = ausência/presença de indaziflam. Letras maiúsculas e minúsculas representam diferenças estatísticas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Própria autora (2026).

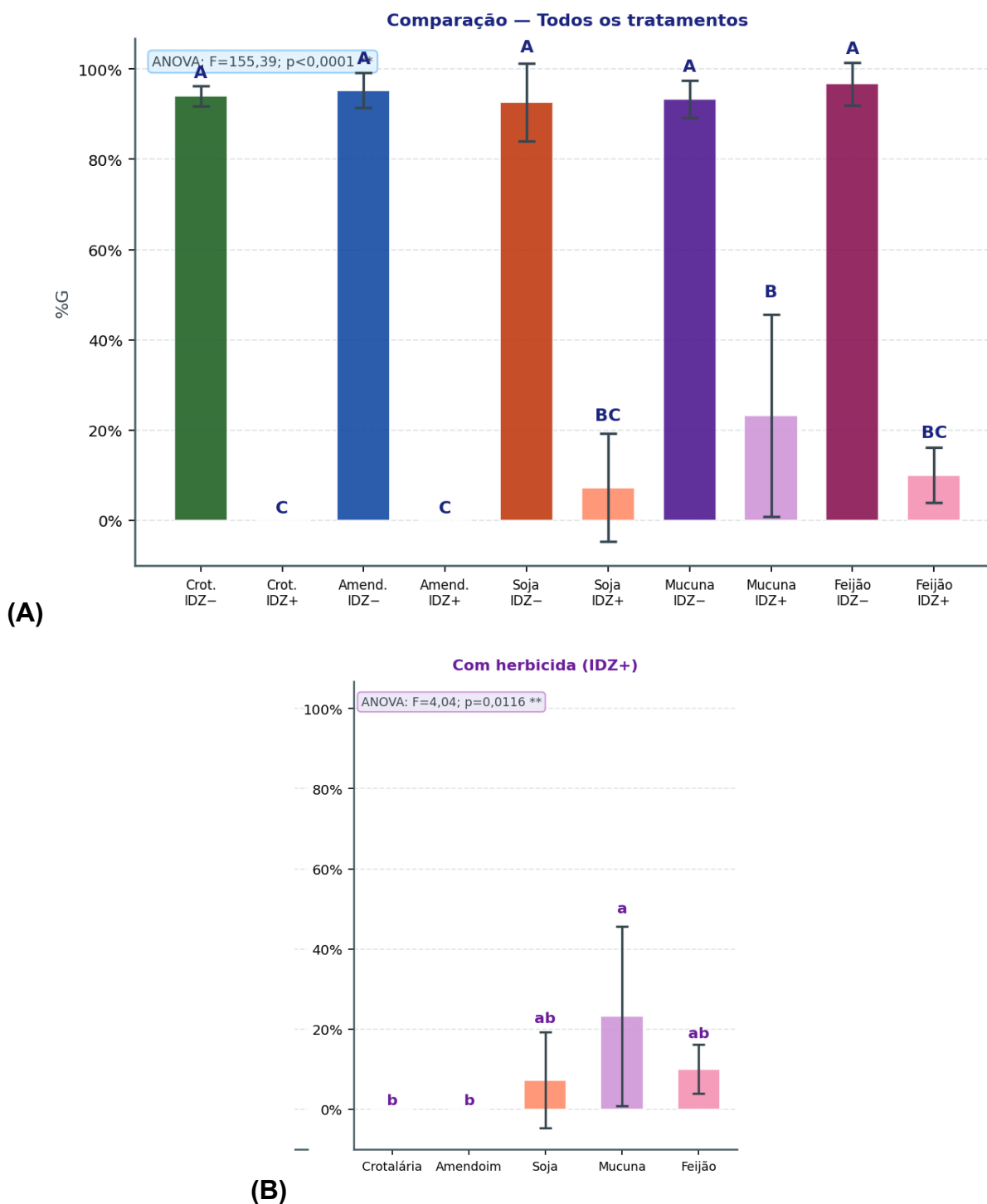
Os resultados da porcentagem de germinação (%G), apresentados na Figura 7, evidenciaram esse efeito significativo na presença do indaziflam. Na comparação entre todos os tratamentos (Figura 7A), observou-se que as amostras de solo sem o herbicida (IDZ-) apresentaram elevados percentuais de germinação, todos superiores a 92%, não diferindo estatisticamente entre si quanto às culturas. Em contraste, a presença do indaziflam promoveu redução expressiva na germinação organismo-teste, independentemente da presença das leguminosas.

Entre os tratamentos submetidos ao herbicida (Figura 7B), o cultivo de mucuna-cinza permitiu maior porcentagem de germinação da espécie bioindicadora (23,33%). Por outro lado, o solo cultivado com crotalária e amendoim apresentou ausência total de germinação, demonstrando nenhum efeito das leguminosas sobre a ecotoxicidade. Quando presente soja ou feijão-de-porco, o organismo-teste apresentou comportamento intermediário, com percentuais de germinação de 7,33% e 10,00%, respectivamente, sem diferirem estatisticamente dos solos cultivados com as outras plantas.

Esse comportamento é semelhante ao observado por Frias et al. (2023), que verificaram alterações no desenvolvimento inicial de *Mucuna pruriens* cultivadas em solo com o herbicida tebuthiuron. Os autores destacaram que herbicidas persistentes podem comprometer a emergência e o estabelecimento de vegetais mais sensíveis, incluindo espécies não alvo, afetando diretamente o potencial de desenvolvimento das plântulas. Nesse contexto, os bioensaios ecotoxicológicos com *Lactuca sativa* reforçam essa observação, pois a redução da emergência das sementes observada neste estudo indica a ocorrência de efeitos relacionados à permanência do herbicida no solo.

Também, Helander et al.(2019) observaram redução na germinação e no crescimento inicial de plantas de interesse agrícola (aveia, batata, fava e nabo-forrageiro) expostas a resíduos de glifosato no solo. Embora este herbicida apresente mecanismo de ação diferente do indaziflam, os autores verificaram que a presença residual afetou o estabelecimento inicial das plantas, com respostas distintas de tolerância entre as espécies avaliadas.

Figura 8: Porcentagem de germinação (%G) do organismo-teste (alface) em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.



Legenda: IDZ-/IDZ+ = ausência/presença de indaziflam. Letras maiúsculas e minúsculas representam diferenças estatísticas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Própria autora (2026).

5.2.2. Desenvolvimento de hipocótilo e raiz

Na avaliação do comprimento do hipocótilo entre todos os tratamentos (Figura 8A), foi observada diferença significativa nas amostras de solo cultivadas previamente com as leguminosas testadas. Em solo ausente de herbicida (IDZ-), o organismo-teste apresentou o maior e menor comprimento médio de hipocótilo em relação à presença de crotalária (1,87 cm) e soja (1,17 cm), respectivamente.

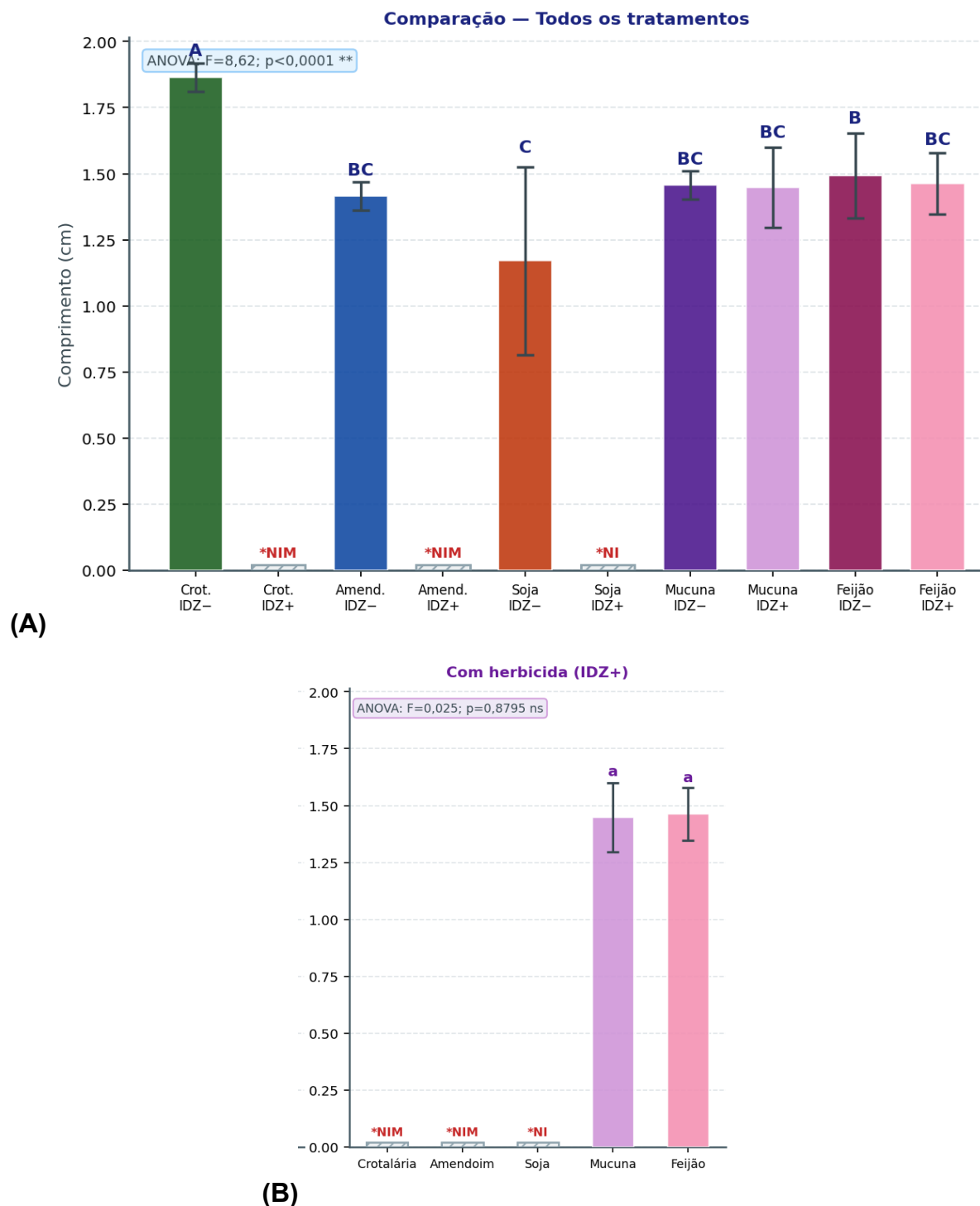
A ausência de diferença significativa entre os tratamentos com e sem indaziflam nos solos cultivados com mucuna-cinza e feijão-de-porco sugere que, para as plântulas de alface que conseguiram emergir, o herbicida exerceu pouca influência sobre o crescimento inicial da parte aérea, avaliado pelo comprimento do hipocótilo.

Nos tratamentos contendo indaziflam (Figura 8B), não foi observada diferença estatística significativa entre as amostras com as diferentes culturas ($p = 0,8795$). Com mucuna-cinza e feijão-de-porco, as plântulas de alface apresentaram comprimentos semelhantes de hipocótilo. Já com crotalária e amendoim, não houve germinação das sementes que impossibilitou a obtenção de dados biométricos. Por fim, as amostras de solo com soja e indaziflam apresentaram apenas duas repetições válidas, o que inviabilizou sua inclusão na análise estatística e demonstrou suscetibilidade ao herbicida.

Em solos cultivados com mucuna-cinza e feijão-de-porco, os organismos-teste apresentaram desenvolvimento de hipocótilo semelhante mesmo na presença do herbicida, demonstrando capacidade de manter o crescimento inicial da parte aérea após a germinação. Em contrapartida, a presença de crotalária ou amendoim não permitiu a emergência das plântulas, o que evidenciou menor efeito na mitigação do efeito tóxico prejudicial do indaziflam no solo.

Belo et al. (2011), ao avaliarem espécies vegetais (amendoim, girassol, feijão-de-porco e lab-lab) cultivadas em solo contaminado com sulfentrazone, também verificaram redução no crescimento inicial das plantas mais sensíveis. Apesar das diferenças entre os mecanismos de ação dos herbicidas, os autores observaram que feijão-de-porco e lab-lab mantiveram parcialmente o desenvolvimento em condições de contaminação, comportamento semelhante ao observado para mucuna-cinza e feijão-de-porco neste estudo.

Figura 9: Comprimento do hipocótilo das plântulas do organismo-teste (alface) em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.



Legenda: IDZ-/IDZ+ = ausência/presença de indaziflam. NI = número insuficiente de repetições. NIM = número insuficiente por morte. Letras maiúsculas e minúsculas representam diferenças estatísticas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Própria autora (2026).

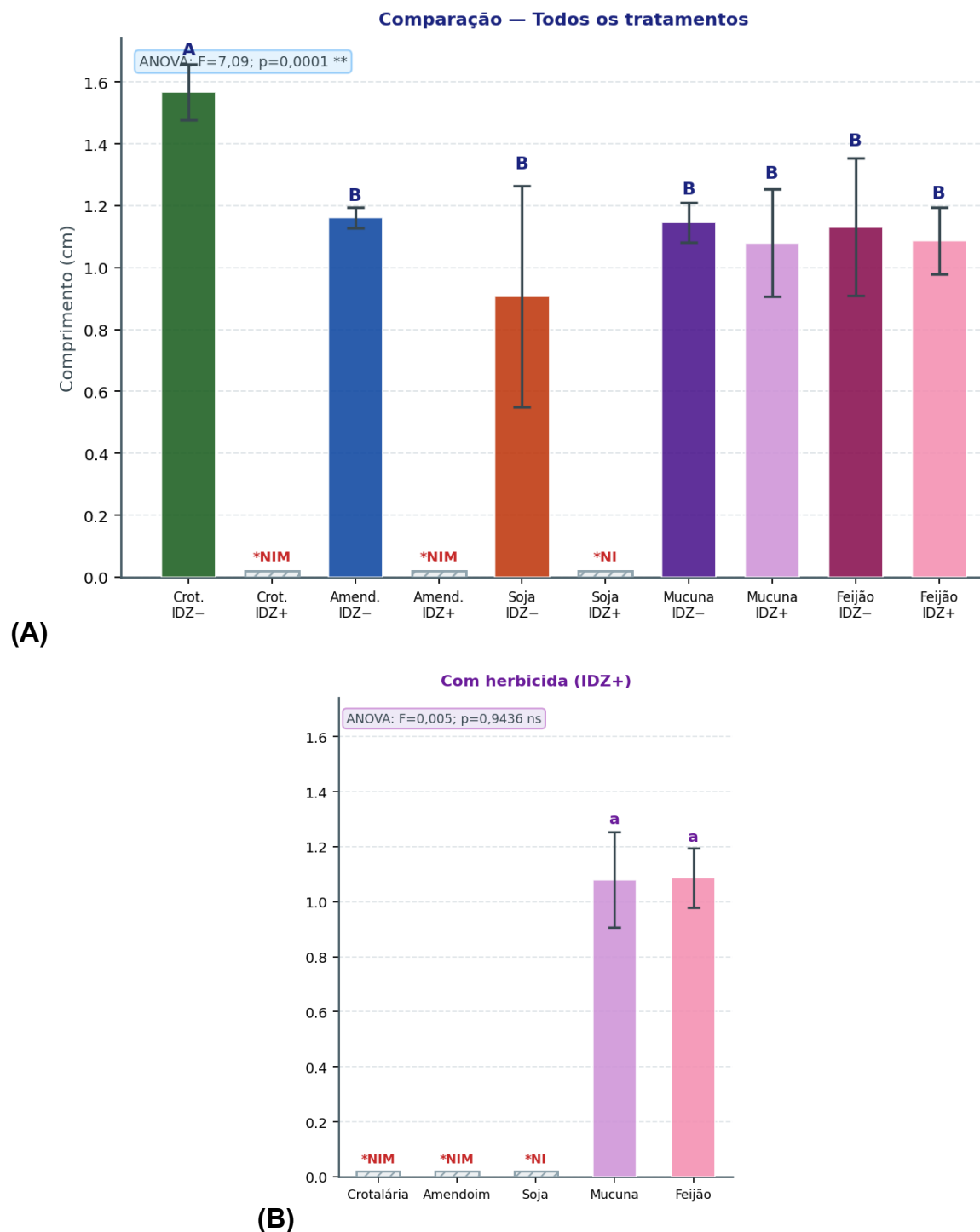
O desenvolvimento radicular também apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados (Figura 9A). A crotalária cultivada na ausência do indaziflam propiciou maior valor de raiz à espécie bioindicadora (1,57 cm), sendo diferente de todos os outros tratamentos. Os demais tratamentos com dados válidos apresentaram menores comprimentos radiculares e não diferiram estatisticamente entre si.

Ao analisar apenas os tratamentos submetidos ao indaziflam (Figura 9B), não foram observadas diferenças estatísticas significativas para o efeito das leguminosas no solo ($p = 0,9436$). Apenas na presença prévia de mucuna-cinza ou feijão-de-porco foi observado desenvolvimento das plântulas do organismo-teste, pois, quando presente crotalária, amendoim ou soja, não houve número válido de repetições ou ainda não houve germinação.

Notou-se que o sistema radicular foi uma das estruturas mais afetadas pela presença residual do indaziflam, provavelmente por representar o primeiro ponto de contato da plântula com o herbicida. Apesar do organismo-teste ter conseguido germinar sob sua presença, houve redução no crescimento das raízes, embora com a presença de mucuna-cinza ou feijão-de-porco tenham mantido esse desenvolvimento semelhante. Neste sentido, Cruz et al. (2024) também observaram redução no crescimento radicular das plantas mucuna-cinza (*Mucuna pruriens*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) em solo contaminado com o herbicida tebuthiuron. Nesse estudo, a persistência residual do herbicida interferiu diretamente no desenvolvimento inicial das espécies, comprometendo principalmente aquelas mais sensíveis durante os estágios iniciais de crescimento. Além disso, os bioensaios ecotoxicológicos realizados com *Lactuca sativa* evidenciaram que a toxicidade residual do tebuthiuron afetou o índice de germinação e o desenvolvimento das plântulas, confirmando o potencial do herbicida em causar efeitos adversos sobre organismos não alvo e demonstrando a eficiência da fitorremediação na redução da toxicidade do solo ao longo do tempo.

Semelhantemente, Souza et al. (2007) observaram que o estresse pela contaminação do solo com chumbo afeta o desenvolvimento radicular de leguminosas, como mucuna-anã (*Mucuna deeringiana*) e feijão-espada (*Canavalia gladiata*). Embora seja um metal pesado, algumas leguminosas conseguiram manter o crescimento das raízes em condição de contaminação.

Figura 10: Desenvolvimento da raiz das plântulas do organismo-teste (alface) em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.



Legenda: IDZ-/IDZ+ = ausência/presença de indaziflam. NI = número insuficiente de repetições. NIM = número insuficiente por morte. Letras maiúsculas e minúsculas representam diferenças estatísticas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Própria autora (2026).

5.2.3. Biomassa total

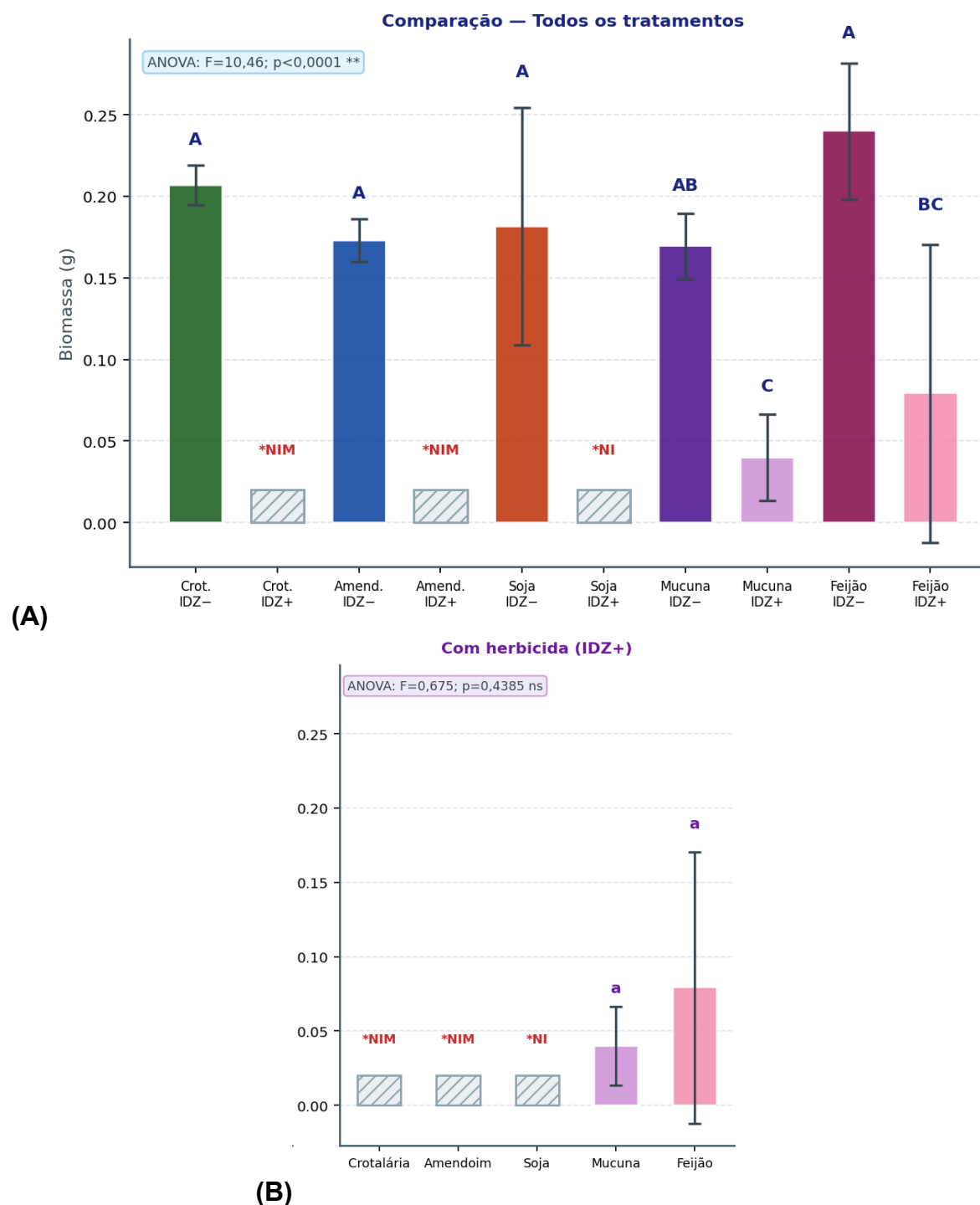
A produção de biomassa das plântulas foi influenciada pela presença do indaziflam nos tratamentos avaliados, como é possível analisar na Figura 10A. Em solos com feijão-de-porco na ausência do herbicida (IDZ-), o organismo-teste apresentou a maior biomassa média (0,2398 g), enquanto no tratamento com mucuna-cinza IDZ+, houve o menor valor (0,0398 g). Com crotalária e amendoim submetidos ao indaziflam, não houve germinação das sementes do organismo-teste, impossibilitando a obtenção de dados biométricos.

Quando focado apenas entre os tratamentos contendo indaziflam (Figura 10B), não foram observadas diferenças estatísticas significativas para as amostras cultivadas com mucuna-cinza e feijão-de-porco ($p = 0,4385$). Este fato indica um comportamento semelhante quanto à produção de biomassa nos testes de ecotoxicidade sob presença do herbicida.

A redução da biomassa nos tratamentos com indaziflam demonstra que o herbicida comprometeu o crescimento acumulado das plântulas ao longo do período experimental. Mesmo em solos onde as sementes de alface conseguiram emergir, o desenvolvimento foi limitado, resultando em menor produção de biomassa em comparação aos tratamentos ausentes de herbicida.

Ainda assim, em solos cultivados com a mucuna-cinza e feijão-de-porco, o organismo-teste manteve desenvolvimento suficiente para a formação das plântulas. Esses resultados indicam maior efeito dessas espécies ao efeito residual do herbicida no solo. Cruz et al. (2024) verificaram que estas espécies demonstraram certa tolerância ao impacto residual do herbicida tebuthiuron, apesar do prejuízo no desenvolvimento vegetal. Plantas de mucuna-cinza (*Mucuna pruriens*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) tiveram redução no crescimento e na produção de biomassa em solo com tebuthiuron.

Figura 11: Biomassa total do organismo-teste (alface) em relação às amostras de solo nas diferentes leguminosas: (A) na ausência/presença de indaziflam, (B) apenas na presença do herbicida.



Legenda: IDZ-/IDZ+ = ausência/presença de indaziflam. NI = número insuficiente de repetições. NIM = número insuficiente por morte. Letras maiúsculas e minúsculas representam diferenças estatísticas entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Própria autora (2026).

6. CONCLUSÃO

O indaziflam apresentou efeito residual no solo, afetando diretamente as respostas ecotoxicológicas do organismo-teste utilizado nos bioensaios (*Lactuca sativa*). A presença do herbicida reduziu a velocidade e a porcentagem de germinação das sementes, além de comprometer o desenvolvimento do hipocótilo, do sistema radicular e o acúmulo de biomassa das plântulas expostas aos solubilizados dos solos avaliados.

Em relação ao cultivo prévio das diferentes leguminosas, a presença de mucuna-cinza e feijão-de-porco proporcionou melhores respostas à mitigação dos efeitos ecotoxicológicos para a espécie bioindicadora na presença do indaziflam. Em contrapartida, os solos cultivados com crotalária e amendoim apresentaram elevada toxicidade residual, resultando em ausência de germinação do organismo-teste quando presente o herbicida. A soja apresentou comportamento intermediário, porém com número insuficiente de repetições válidas para algumas análises biométricas.

Portanto, foi demonstrado que a escolha da leguminosa utilizada como cultura de sucessão em solo agrícola com resíduos de indaziflam influenciou de maneira distinta a resposta ecotoxicológica do meio. Dessa forma, o uso de mucuna-cinza e feijão-de-porco apresentou maior potencial para utilização em estratégias de fitorremediação e manejo sustentável de áreas agrícolas com indaziflam, como canaviais, por favorecerem melhores condições ao desenvolvimento e ao desempenho fisiológico do organismo-teste em solos com a presença deste herbicida.

7. REFERÊNCIAS

- ABADYA, S.; SHIMELIS, H.; JANILA, P.; MASHILO, J. Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) improvement in Sub-Saharan Africa: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica: Section B – Soil & Plant Science*, v. 69, n. 6, p. 528–545, 2019.
- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 299–352.
- ALONSO, D. G. et al. Sorption-desorption of indaziflam in selected agricultural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 59, n. 24, p. 13096–13101, 2011.
- AMIM, R. T. et al. Controle de plantas daninhas pelo indaziflam em solos com diferentes características físico-químicas. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 791–800, 2014.
- ANTONIO, M. et al. Desempenho de crotalária cultivada em diferentes épocas de semeadura e de corte. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 59, n. 3, p. 386–391, 2012.
- BELO, A. F.; FERREIRA, L. R.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B.; CECON, P. R. Potencial de espécies vegetais na remediação de solo contaminado com sulfentrazone. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 821–828, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Regras para análise de sementes*. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 395 p.
- BRESSIANI, T. S. C.; SIQUEIRA, B. B. O uso de agrotóxicos e os impactos na saúde do trabalhador rural: uma revisão sobre o herbicida glifosato. *Revista Vértices*, v. 25, n. 2, 2023.
- CAMESELLE, C.; CHIRAKKARA, R. A.; REDDY, K. R. Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: status and opportunities. *Chemosphere*, v. 93, n. 4, p. 626–636, 2013.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Estimação da área foliar de mucuna cinza por meio de método não destrutivo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 42, n. 2, p. 238–242, 2012.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Tamanho de parcela para avaliar a massa de plantas de mucuna cinza. *Comunicata Scientiae*, v. 5, n. 2, p. 196–204, 2014.
- COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em fritura. *Química Nova*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 531–537, 2000.
- CRUZ, S. C. S. et al. Cultivo de soja sob diferentes densidades de semeadura e arranjos espaciais. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia, v. 3, n. 1, p. 1–6, 2016.

CRUZ, V. H. et al. Leguminous plants and microbial inoculation: an approach for biocatalytic phytoremediation of tebuthiuron in agricultural soil. *Agronomy*, Basel, v. 14, n. 12, p. 2805, 2024.

DUARTE JÚNIOR, J. B.; COELHO, F. C. Adubos verdes e seus efeitos no rendimento da cana-de-açúcar em sistema de plantio direto. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 3, p. 723–732, 2008.

DUTRA, F. B. et al. Pre-emergent indaziflam can enhance forest seed germination in direct seeding? *Brazilian Journal of Biology*, São Carlos, v. 83, e268716, 2023.

FRIAS, Y. A. et al. *Mucuna pruriens* cannot develop phytoremediation of tebuthiuron in agricultural soil with vinasse: a morphometrical and ecotoxicological analysis. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Lausanne, v. 11, p. 1156751, 2023.

FUJIHARA, R. T.; FAEZ, R. Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente é vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente (PPGAA). *Ciência, Tecnologia & Ambiente*, v. 2, n. 1, 2015.

FURLAN, D. A. *Efeito residual de indaziflam em amendoim*. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), [S. l.], 2020.

HELANDER, M. et al. Glyphosate residues in soil affect crop plant germination and growth. *Scientific Reports*, London, v. 9, n. 1, p. 19653, 2019.

HOU, D.; AL-TABBAA, A. Sustainability: a new imperative in contaminated land remediation. *Environmental Science & Policy*, v. 39, p. 25–34, 2014.

HUNTER, J. D. Matplotlib: a 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, v. 9, p. 90–95, 2007.

LI, H. L.; BOUFADEL, M. C. Long-term persistence of oil from the Exxon Valdez spill in two-layer beaches. *Nature Geoscience*, v. 3, p. 96–99, 2010.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination: aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, Madison, v. 2, n. 2, p. 176–177, 1962.

MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. Efeito residual de herbicidas no solo (carryover). *Revista Brasileira de Herbicidas*, Londrina, v. 10, n. 2, p. 151–158, 2011.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. 9. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. 736 p.

NASCIMENTO, J. M. et al. Número de aplicações e uso de adjuvantes adicionados a fungicidas no controle da ferrugem asiática da soja. *Agrarian*, Dourados, v. 11, n. 40, p. 95–104, 2018.

PEREIRA, G. et al. Efeito do cultivo de *Crotalaria juncea* em rotação com cana-de-açúcar sobre parâmetros físicos do solo. *Journal of Agronomic Sciences*, v. 6, p. 1–12, 2017.

PERRY, D. H. et al. Indaziflam utilization for controlling problematic turfgrass weeds. *Applied Turfgrass Science*, v. 8, n. 1, 2011.

PIEPHO, H. P. An algorithm for a letter-based representation of all-pairwise comparisons. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, v. 13, n. 2, p. 456–466, 2004.

PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de estatística experimental*. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009. 451 p.

PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. *Planta Daninha*, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 335–341, 2003.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python language reference*, version 3.12. Disponível em: <https://www.python.org>. Acesso em: maio 2026.

RUGANA IMBANA et al. Leguminosas como plantas de cobertura para melhoria da qualidade do solo. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 16, n. 4, p. 351–357, 2021.

SANTOS, T. A. C.; VAZ, G. A. S.; COSTA, M. F. B. V.; ANDRADE-VIEIRA, L. F. Monitoring the toxicity of effluents from an industrial waste treatment plant using seed germination and early development plant-based bioassays: a case study. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, published online, 19 nov. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/15287394.2025.2587299>

SCIPY COMMUNITY. *SciPy: open source scientific tools for Python*. Disponível em: <https://scipy.org>. Acesso em: maio 2026.

SEABOLD, S.; PERKTOLD, J. Statsmodels: econometric and statistical modeling with Python. In: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 9., 2010, Austin. *Proceedings...* Austin: SciPy, 2010.

SILVEIRA, L. C. I.; OLIVEIRA, M. W.; MARQUES, T. S. *Produção de cana-de-açúcar*. Viçosa, MG: PEC-UFV, 2019.

SOUZA, L. A. *Potencial fitorremediador de leguminosas herbáceas associadas a fungos micorrízicos arbusculares em solo contaminado com chumbo*. 2007. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/480732>. Acesso em: 18 mar. 2026.

STEFFEN, G. P. K.; STEFFEN, R. B.; ANTONIOLLI, Z. I. Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos. *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 1, p. 15–21, 2011.

STOCO, E. D. *Avaliação da fitotoxicidade de glifosato em plantas cultivadas*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2025.

TEIXEIRA, C. M. et al. Liberação de macronutrientes das palhadas de milheto solteiro e consorciado com feijão-de-porco sob cultivo de feijão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 2, p. 497–506, 2010.

TOEBE, M. et al. Modelos para a estimação da área foliar de feijão-de-porco por dimensões foliares. *Bragantia*, v. 71, n. 1, p. 37–41, 2012.

TOMPKINS, J. *Pesticide fact sheet: indaziflam*. United States Environmental Protection Agency, 2010. Disponível em: http://www.epa.gov/opp00001/chem_search/reg_actions/registration/fs_PC-080818_26-Jul-10.pdf. Acesso em: 18 mar. 2026.

TUKEY, J. W. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, v. 5, n. 2, p. 99–114, 1949.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Oilseeds: world markets and trade*. Foreign Agricultural Service, 2017. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2026.

URQUIAGA, S. Desempenho agrônômico de *Crotalaria juncea* em diferentes arranjos populacionais e épocas do ano. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/96027689/cot082.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2026.

VIVIAN, R. et al. Adsorção e dessorção de trifloxysulfuron-sodium e ametryn em solos brasileiros. *Planta Daninha*, v. 25, n. 1, p. 97–109, 2007.

ZAR, J. H. *Biostatistical analysis*. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 944 p.