

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**POTENCIAL ALELOPÁTICO DE *Synedrellopsis grisebachii*:  
UMA ABORDAGEM PARA O CONTROLE SUSTENTÁVEL  
DE PLANTAS DANINHAS**

**Ailton Alves Martins**

**Licenciado em Ciências Biológicas**

**Bacharel em Ciências Biológicas (Biotecnologia)**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**POTENCIAL ALELOPÁTICO DE *Synedrellopsis grisebachii*:  
UMA ABORDAGEM PARA O CONTROLE SUSTENTÁVEL  
DE PLANTAS DANINHAS**

**Ailton Alves Martins**

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

**Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,  
Câmpus de Jaboticabal, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)**

**2025**

M386p	<p>Martins, Ailton Alves</p> <p>POTENCIAL ALELOPÁTICO DE SYNEDRELLOPSIS GRISEBACHII: UMA ABORDAGEM PARA O CONTROLE SUSTENTÁVEL DE PLANTAS DANINHAS / Ailton Alves Martins. -- Jaboticabal, 2025</p> <p>40 p.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Pedro Luís da Costa Aguiar Alves</p> <p>1. Alelopatia. 2. agriãozinho. 3. fitotoxicidade. 4. herbicida natural. 5. Lemna minor. I. Título.</p>
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** POTENCIAL ALEOPÁTICO DE *SYNEDRELLOPSIS GRISEBACHII*: UMA ABORDAGEM PARA O CONTROLE SUSTENTÁVEL DE PLANTAS DANINHAS

**AUTOR:** AILTON ALVES MARTINS

**ORIENTADOR:** PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PEDRO LUÍS DA COSTA AGUIAR ALVES (Participação Presencial)  
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. JHANSLEY FERREIRA DA MATA (Participação Presencial)  
Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas / Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - Frutal/MG

Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participação Presencial)  
Departamento de Biologia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 07 de novembro de 2025.

## DADOS CURRICULARES DO AUTOR

**Ailton Alves Martins**, nascido em 15/04/1996. Filho de Iraci Alves Martins, que exerceu o papel de mãe e pai, tendo criado 6 filhos, e de Paulo Alves Martins. Atualmente mestrando no Laboratório de Plantas Daninhas (LAPDA), com o objetivo de compreender o potencial alelopático de *Synedrellopsis grisebachii*, com a orientação do Prof. Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves. Graduado em Bacharel em Ciências Biológicas com ênfase em Biotecnologia na (UNESP-FCAV) - 2023. Licenciado em Ciências Biológicas pela (UNESP-FCAV) - 2018. Experiência como aluno de iniciação científica no Laboratório de Biologia Mitocondrial (LBMT) da UNESP-FCAV, tendo finalizado três bolsas FAPESP de iniciação científica. Bolsista da Proex, sob orientação da Prof. Dra. Vera Cristina Silva, com a qual realizou diversos projetos de extensão. Como experiência internacional, realizou um intercâmbio de dezoito meses (setembro 2019 - março 2021) com vínculo de Faculty/ Staff "Research Scholar" em Michigan State University, no Arnosti Laboratory, tendo como foco em compreender a regulação transcricional do receptor de insulina em células de cultura de *Drosophila*.

- *“Heal the World”*  
Tradução - *“Cure o mundo”*  
- Michael Jackson

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço, primeiramente, ao universo, no qual tive a oportunidade de conhecer, aprender e trabalhar em áreas da ciência que tanto me admira a complexidade.

À minha família, em especial a minha mãe, pelo amor incondicional, incentivo constante e apoio em todos os momentos, mesmo não estando presente.

À minha esposa; que iniciamos namorados e terminamos casados, e que se tornou parte essencial da minha vida ao longo do desenvolvimento deste trabalho, agradeço pelo amor, paciência, compreensão e apoio incondicional. Sua presença, incentivo diário e confiança foram fundamentais para que eu continuasse em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores desta trajetória. Obrigado, Preta.

Ao Professor Dr. Pedro, pela orientação criteriosa, disponibilidade, paciência e valiosas contribuições científicas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Além de tudo é um ser humano ímpar, que demonstra sabedoria em ínfimos gestos no dia a dia, com seu olhar e forma de lidar com o desafios com maestria e, principalmente, leveza. Sua experiência e dedicação foram extremamente fundamentais para o amadurecimento deste trabalho e para minha formação acadêmica e profissional.

Aos professores do programa de pós-graduação, pelos ensinamentos transmitidos, pelas discussões enriquecedoras e pelo compromisso com a excelência na formação científica. Agradeço, também, a todos os funcionários da instituição, que normalmente são apaixonados e atenciosos.

Aos colegas de laboratório, pela convivência, pelas trocas de conhecimento, pelo apoio nos momentos de dificuldade e pelos incentivos ao longo dessa trajetória. O companheirismo e a colaboração tornaram este caminho mais leve e produtivo.

À FCAV e ao programa de Produção Vegetal, pela infraestrutura, suporte acadêmico e oportunidades oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo bolsa concedida, fundamental para a realização desta pesquisa e para a viabilização das atividades desenvolvidas ao longo do curso.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação e para minha formação científica e pessoal.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. Produção Vegetal.....	3
2.2. Desafios .....	5
2.3. Plantas daninhas.....	6
2.4. Biológicos.....	7
2.5. Alelopatia .....	8
2.6. <i>Synedrellopsis grisebachii</i> .....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	13
3.1. Bioensaio de citotoxicidade: coleóptilo de trigo .....	13
3.2. Bioensaio de fitotoxicidade .....	14
3.3. Ensaio de despigmentação em <i>Lemna minor</i> .....	15
3.4. Análises estatísticas.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1. Citotoxicidade .....	17
4.2. Fitotoxicidade .....	19
4.3. Fitotoxicidade: efeito na parte aérea das plântulas .....	21
4.4. Fitotoxicidade: efeito na parte radicular .....	23
4.5. Resposta de <i>Lemna minor</i> à exposição ao extrato de agriãozinho.....	25
5. CONCLUSÕES .....	27
6. REFERÊNCIAS.....	27



## POTENCIAL ALELOPÁTICO DE *SYNEDRELLOPSIS GRISEBACHII*: UMA ABORDAGEM PARA O CONTROLE SUSTENTÁVEL DE PLANTAS DANINHAS

**RESUMO** – Este estudo investigou o potencial alelopático da espécie *Synedrellopsis grisebachii* (agriãozinho), com foco em sua atividade fitotóxica sobre *Lactuca sativa*, *Sorghum bicolor* e *Portulaca oleracea*. Foram realizados bioensaios com extrato vegetal de agriãozinho em diferentes concentrações (12,5; 50; 100; 200; 400 e 800 ppm), avaliando-se os efeitos sobre a germinação e o crescimento inicial destas três espécies. Adicionalmente, foi realizado um experimento com *Lemna minor* com o intuito de verificar possíveis efeitos visuais de toxicidade aquática. Avaliou-se, ainda, a citotoxicidade dos extratos em coleóptilos de trigo (*Triticum aestivum*). Os resultados demonstraram inibição significativa da germinação e do crescimento de *S. bicolor*, além de resposta hormética em *L. sativa* e *P. oleracea* na concentração de 50 ppm, com estímulo no crescimento radicular. Em *L. minor*, observou-se despigmentação progressiva das frondes, especialmente nas concentrações mais elevadas, sugerindo interferência direta nos processos fotossintéticos. Tais efeitos são atribuídos à presença de aleloquímicos, como lactonas sesquiterpênicas, fenóis e saponinas, confirmando o potencial do agriãozinho como fonte de moléculas bioativas com ação herbicida natural. Dessa forma, os resultados reforçam a relevância da biodiversidade vegetal como base promissora para o desenvolvimento de bioinsumos agrícolas ambientalmente sustentáveis.

**Palavras-chave:** Alelopatia, agriãozinho, fitotoxicidade, herbicida natural e *Lemna minor*.

## ALLELOPATHY POTENTIAL OF *SYNEDRELLOPSIS GRISEBACHII*: AN APPROACH FOR SUSTAINABLE WEED CONTROL

**ABSTRACT** - This study investigated the allelopathic potential of the species *Synedrellopsis grisebachii* (little cress), focusing on its phytotoxic activity on *Lactuca sativa*, *Sorghum bicolor*, and *Portulaca oleracea*. Bioassays were performed with little cress plant extract at different concentrations (12.5, 50, 100, 200, 400, and 800 ppm), evaluating the effects on germination and initial growth of these three species. Additionally, an experiment was carried out with *Lemna minor* to assess possible visual effects of aquatic toxicity. Cytotoxicity of the extracts was also evaluated in wheat coleoptiles (*Triticum aestivum*). The results showed significant inhibition of germination and growth in *S. bicolor*, along with a hormetic response in *L. sativa* and *P. oleracea* at 50 ppm, characterized by stimulation of root growth. In *L. minor*, progressive frond depigmentation was observed, especially at higher concentrations, suggesting direct interference in photosynthetic processes. These effects are attributed to the presence of allelochemicals, such as sesquiterpene lactones, phenols, and saponins, confirming the potential of *S. grisebachii* as a source of bioactive molecules with natural herbicidal action. Therefore, the findings highlight the relevance of plant biodiversity as a promising basis for the development of environmentally sustainable agricultural bioinputs.

**Keywords:** Allelopathy, phytotoxicity, natural herbicide, *Lemna minor*

## 1. INTRODUÇÃO

As plantas daninhas causam diversos problemas na agricultura e, dentre os principais, destacam-se as perdas quantitativas e qualitativas na produtividade e, conseqüentemente, resultando prejuízo financeiro significativo (Délye et al., 2013; Pereira et al., 2017; Hinz et al., 2020). A magnitude dessas perdas pode variar dependendo da cultura e da comunidade infestante, dentre outros fatores, e dados mostram perdas entre 5 e 90 % na produção (Giraldeli, 2019; Schedenfeldt et al., 2022).

As plantas daninhas também provocam ameaça aos ecossistemas, porque comumente têm maior capacidade competitiva se comparadas com plantas cultivadas e nativas. Em determinados casos, essa competição pode levar à eliminação total das plantas afetadas. As espécies infestantes competem intensamente por diversos recursos essenciais ao desenvolvimento vegetal, como nutrientes, água, luz e espaço. (Sinden et al., 2004; Marx et al., 2012; Pereira et al., 2014; Amaral et al., 2015).

No intuito de controlar essas perdas, desenvolveram-se herbicidas sintéticos por volta de 1930 (Dayan, 2019). Estes herbicidas tiveram um grande destaque na agricultura global por várias décadas. No entanto, o uso frequente e, em muitos casos, inadequado desses compostos químicos resultou em diversos impactos negativos. Entre os principais efeitos observados estão: a seleção da comunidade infestante, surgimento de espécies resistentes, degradação do solo, poluição ambiental, efeitos adversos em organismos que não são alvos e danos à saúde humana (Lopes e Albuquerque, 2018).

Os relatos de resistência de plantas daninhas a herbicidas convencionais datam desde a década de 70 (Christoffoleti et al., 1994), um problema que deve ser sanado através de novas tecnologias e que apresenta urgência de resolução (Christoffoleti e López-Ovejero, 2003; Délye et al., 2013; Dayan, 2019). A resistência adquirida pelas plantas daninhas ao uso recorrente de herbicidas convencionais é um dos principais obstáculos ao manejo eficaz. Com o tempo, o ingrediente ativo utilizado tende a perder sua eficiência, apresentando efeitos nulos ou significativamente reduzidos sobre as espécies-alvo. (Délye et al., 2013; Dayan, 2019; Ziska, 2020). Com isso, torna-se necessário recorrer a formulações químicas

mais potentes, as quais, porém, tendem a ser mais agressivas ao meio ambiente e à saúde humana (Sinden et al., 2004; Dayan, 2019).

Além dos impactos decorrentes dos herbicidas sintéticos, diversos estudos relatam uma associação direta entre esses compostos e a aceleração das mudanças climáticas; uma associação é o uso incorreto de glifosato e 2,4-D que pode aumentar emissões de gases em áreas úmidas, impactante nas mudanças climáticas (Alberto et al., 2016; Varanasi et al., 2016; Ziska, 2020; Cornish et al., 2024). Diante dos crescentes desafios ambientais e da necessidade de garantir a segurança alimentar, há um empenho global significativo voltado à promoção de maior sustentabilidade nos sistemas de produção agrícola.

Nesse contexto, o setor agrônômico tem evidenciado a valorização de insumos que resultam em produtos de base biológica. Contudo, apesar do avanço e do surgimento de novas soluções, ainda persistem diversos desafios e, dentre eles, a supressão das plantas daninhas em áreas cultivadas, com defensivos que sejam naturais. Contudo, ainda não há produtos biológicos registrados para o controle dessas plantas infestantes em áreas de produção agrícola (Kostina-Bednarz et al., 2023).

Entre as alternativas estudadas para o controle natural de plantas daninhas, destaca-se a alelopatia (Marx et al., 2012; Shaner e Beckie, 2014; Dayan, 2019), um mecanismo pelo qual certas plantas são capazes de inibir ou estimular, parcial ou totalmente, o crescimento de outras espécies ao seu redor através da liberação de compostos químicos, conhecidos como aleloquímicos, no ambiente. Com o avanço do conhecimento sobre os mecanismos de ação alelopática, esses compostos têm se mostrado promissores para aplicações como herbicidas naturais, entre outros usos potenciais (Saha et al., 2018; Scavo et al., 2019; Kostina-Bednarz et al., 2023).

Devido à riqueza de organismos no Brasil, diversas plantas da flora brasileira apresentam potencial alelopático e, dentre elas, tem-se a espécie *Synedrellopsis grisebachii*, popularmente conhecida como agriãozinho. Trabalhos na literatura indicaram potencial alelopático desta espécie (Hernández et al., 1996; Bejo, 2005; Barros et al., 2009). O agriãozinho, pertencente à família Asteraceae, é uma planta nativa da América do Sul que, apesar de seu hábito prostrado, herbáceo e rasteiro, demonstra notável capacidade de superar gramíneas forrageiras (Kissmann e Groth, 2000). Essa agressividade é atribuída aos compostos químicos que a planta

libera no ambiente, os quais podem inibir o crescimento das espécies vizinhas ou, em alguns casos também pode promover o crescimento (Hernández et al., 1996).

O agriãozinho produz diversas classes de compostos com potencial alelopático, incluindo fenólicos, taninos, saponinas, alcaloides, esteroides e, especialmente, lactonas sesquiterpênicas, estas últimas consideradas as principais responsáveis pelos efeitos alelopáticos observados (Hernández et al., 1996; Bejo, 2005; Barros et al., 2009). Esses compostos são capazes de interferir em processos fundamentais das plantas vizinhas, como a germinação de sementes, o crescimento e alongamento das raízes. As lactonas sesquiterpênicas possuem atividade bioativa com propriedades herbicidas, agindo principalmente pela inibição da divisão celular e do crescimento das plantas, além de causarem danos às membranas celulares, proteínas e ao DNA (Picman, 1986).

Embora essas substâncias confirmem potencial alelopático do agriãozinho, estudos adicionais são necessários para esclarecer detalhadamente seus mecanismos de ação e identificar possíveis novos compostos bioativos presentes nessa espécie. Além disso, ainda há pouco conhecimento sobre a aplicação prática desses compostos em culturas agrícolas, especialmente no que se refere à minimização ou eliminação dos danos causados por plantas infestantes.

Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial alelopático do agriãozinho sobre *Lactuca sativa*, *Sorghum bicolor* e *Portulaca oleracea*. Essa investigação contribui para o entendimento de um fenômeno biológico de grande relevância e para o desenvolvimento de tecnologias capazes de enfrentar um problema crescente, especialmente diante do aumento da população mundial e da consequente demanda por produção de alimentos (Kostina-Bednarz et al., 2023).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Produção Vegetal**

A produção vegetal desempenha papel central no abastecimento global de alimentos, fibras e energia, sendo responsável por sustentar o crescimento demográfico e econômico desde o surgimento do *homem sapiens*. No entanto, apesar dos avanços tecnológicos que proporcionaram significativos incrementos de produtividade, o setor enfrenta desafios crescentes frente a questões demográficas,

ambientais, tecnológicos, culturais e sociais. Um dos principais fatores é o crescimento populacional acelerado: em 2022, a população mundial atingiu 8 bilhões de habitantes, e estima-se que até 2050 esse número ultrapasse 9,7 bilhões (UN, 2022). Esse cenário pressiona diretamente os sistemas agrícolas, exigindo aumento da produção em um intervalo de tempo cada vez mais curto (FAO, 2017).

A necessidade de expandir a oferta de alimentos se soma à urgência de adotar estratégias sustentáveis de produção. A chamada “intensificação sustentável” busca elevar a produtividade sem ampliar significativamente os impactos ambientais, promovendo o uso racional de recursos, a redução de insumos químicos sintéticos e a mitigação da emissão de gases de efeito estufa (Tilman et al., 2011). Políticas públicas e iniciativas do setor privado têm direcionado esforços nesse sentido, incentivando práticas como a agricultura de baixo carbono e o desenvolvimento de bioinsumos agrícolas, no qual o Brasil vem se destacando.

Paralelamente, observa-se uma mudança significativa no comportamento dos consumidores, com crescente demanda por alimentos orgânicos e de base sustentável. Esse mercado movimentou cerca de 135 bilhões de euros em 2021 e segue em expansão contínua (Willer et al., 2023). A preferência por produtos orgânicos está associada tanto a preocupações com saúde e qualidade nutricional quanto à busca por sistemas produtivos menos agressivos ao meio ambiente (Willer et al., 2023; Gomiero, 2018).

Neste cenário, o Brasil ocupa posição de destaque. O país consolidou-se como líder mundial em registro e utilização de insumos biológicos, além de deter a maior área de cultivo com essas tecnologias (MAPA, 2023; Embrapa, 2023). Essa liderança se deve ao fato de que os bioinsumos oferecem múltiplas vantagens: apresentam menor impacto ambiental por serem biodegradáveis e altamente específicos, preservam a certificação orgânica das culturas e contribuem para a redução do uso de agroquímicos convencionais (Souza et al., 2022). Assim, alinham-se diretamente ao paradigma da sustentabilidade e à transição para uma bioeconomia agrícola.

Portanto, a produção vegetal contemporânea encontra-se em um ponto de inflexão, no qual a necessidade de garantir segurança alimentar para uma população crescente deve ser conciliada com a adoção de modelos produtivos sustentáveis. O êxito nesse processo será determinante para o equilíbrio entre produtividade, conservação ambiental e saúde humana nas próximas décadas.

## 2.2. Desafios

Além dos desafios relacionados ao crescimento populacional e à necessidade de intensificação sustentável, a produção vegetal também é impactada de forma significativa por fatores bióticos e abióticos que comprometem o desempenho agrícola. Os estresses bióticos incluem a ação de pragas, doenças e plantas daninhas, que juntos representam uma das maiores limitações à produtividade agrícola global. Estima-se que, em média, mais de 30% da produção mundial de alimentos seja perdida anualmente em decorrência da pressão exercida por esses organismos (Savary et al., 2019). Entre eles, as plantas daninhas destacam-se por sua elevada capacidade competitiva por recursos como luz, água e nutrientes, além de reduzirem a eficiência no uso de insumos e aumentarem os custos de manejo (Oerke, 2006; Duke, 2006).

Por outro lado, os estresses abióticos configuram um conjunto de condições ambientais adversas que afetam diretamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das culturas. Entre os principais, destacam-se a seca, o excesso de salinidade no solo, temperaturas extremas, déficit de nutrientes e a crescente incidência de eventos climáticos extremos associados às mudanças climáticas (Lesk et al., 2016). Esses fatores não apenas reduzem a produtividade imediata, mas também comprometem a resiliência dos sistemas agrícolas a médio e longo prazo. Projeções indicam que a frequência e a intensidade de tais eventos tendem a aumentar nas próximas décadas, impondo novos desafios à segurança alimentar (IPCC, 2022).

A interação entre estresses bióticos e abióticos agrava ainda mais esse cenário, uma vez que condições ambientais adversas podem intensificar a suscetibilidade das plantas a pragas e doenças. Por exemplo, períodos de estiagem ou calor extremo podem reduzir a capacidade de defesa fisiológica das culturas, ampliando a severidade de infecções e infestações (Atkinson e Urwin, 2012). Nesse contexto, estratégias de manejo integrado tornam-se essenciais, englobando desde práticas culturais e melhoramento genético até o uso de bioinsumos, que desponham como alternativas sustentáveis para mitigar os efeitos desses estresses (Souza et al., 2022).

Portanto, além das pressões demográficas e da exigência por sustentabilidade, a agricultura contemporânea enfrenta o desafio permanente de lidar com estresses bióticos e abióticos que limitam o potencial produtivo. O

desenvolvimento de tecnologias adaptativas e sustentáveis será determinante para garantir sistemas agrícolas resilientes diante de um futuro marcado por instabilidade climática e crescente demanda alimentar.

### **2.3. Plantas daninhas**

A presença de plantas daninhas em sistemas agrícolas representa uma das maiores preocupações no manejo da produção vegetal, devido à sua elevada capacidade de adaptação, propagação e resistência aos métodos de controle convencionais. Estima-se que, globalmente, perdas potenciais de produtividade decorrentes da interferência das plantas daninhas possam superar 34% em diversas culturas de importância econômica, valor superior às perdas atribuídas a pragas e doenças (Oerke, 2006). Esses impactos decorrem, principalmente, da sua habilidade em competir de forma mais eficiente pelos recursos ambientais, como luz, água, nutrientes e espaço, conferindo-lhes vantagem competitiva significativa sobre as espécies cultivadas (Radosevich et al., 2007).

As espécies infestantes se destacam ainda por apresentarem múltiplas estratégias adaptativas, incluindo elevado potencial reprodutivo, dormência de sementes, plasticidade fenotípica e tolerância a diferentes condições edafoclimáticas (Radosevich et al., 2007). Além disso, a disseminação de biótipos resistentes ao uso contínuo e não rotacionado de herbicidas tem se consolidado como um dos maiores desafios da agricultura moderna. Atualmente, já são registradas centenas de casos de resistência em plantas daninhas a diferentes mecanismos de ação herbicida, incluindo culturas como cana, soja, milho e trigo (Procópio et al., 2024; Zhao et al., 2025).

O manejo de plantas daninhas tradicionalmente se baseia no uso de herbicidas sintéticos, que representam a estratégia de maior eficiência e adoção global. Contudo, a dependência excessiva dessa tecnologia tem levantado preocupações relacionadas à resistência, à contaminação ambiental e aos riscos à saúde humana (Duke, 2006). Nesse sentido, práticas integradas de manejo, que englobam rotação de culturas, coberturas vegetais, consórcios, controle mecânico e uso racional de herbicidas, têm sido amplamente recomendadas para aumentar a eficácia do controle e reduzir a pressão seletiva sobre os biótipos resistentes (Norsworthy et al., 2012).



A crescente demanda por alimentos com menor carga de resíduos químicos e os apelos globais por sustentabilidade têm impulsionado a busca por alternativas inovadoras no controle de plantas daninhas. Nesse contexto, a alelopatia, entendida como o fenômeno de produção e liberação de compostos bioativos por determinadas plantas capazes de inibir a germinação e o crescimento de outras espécies, voltou a ganhar destaque como área promissora de pesquisa (Rice, 2012). Compostos secundários como fenóis, terpenoides, flavonoides e ácidos orgânicos têm demonstrado potencial herbicida natural, abrindo caminho para o desenvolvimento de bioherbicidas e para a integração de práticas mais sustentáveis no manejo (Macías et al., 2019).

Assim, as plantas daninhas constituem não apenas um entrave econômico de grande magnitude, mas também um campo de inovação científica e tecnológica. O desafio atual reside em equilibrar o uso das ferramentas tradicionais, como os herbicidas sintéticos, com o desenvolvimento e a adoção de novas estratégias baseadas em princípios ecológicos e biológicos, capazes de assegurar a produtividade agrícola com menor impacto ambiental.

## **2.4. Biológicos**

Nos últimos anos, o Brasil consolidou-se como um dos principais protagonistas no cenário global de bioinsumos agrícolas, destacando-se como o maior produtor e consumidor mundial desta tecnologia (MAPA, 2023; Embrapa, 2023). Esse crescimento expressivo é reflexo tanto da expansão do agronegócio nacional quanto da crescente demanda por soluções sustentáveis que conciliem produtividade e conservação ambiental. Além disso, o setor tem atraído investimentos privados e fomentado a criação de novas empresas especializadas, o que contribui para o fortalecimento da bioeconomia agrícola no país.

Em dezembro de 2024, foi sancionada a Lei Federal nº 14.785/2024, que estabeleceu o marco legal dos bioinsumos no Brasil, com o objetivo de estimular a pesquisa, o desenvolvimento e a produção desses insumos, além de desburocratizar os processos de registro e comercialização. A nova legislação busca integrar bioinsumos em programas nacionais de incentivo à agricultura de baixo carbono e à produção sustentável, reforçando o papel estratégico do Brasil como referência internacional nessa área (Brasil, 2024).

Os bioinsumos compreendem uma ampla gama de produtos, incluindo biofertilizantes, bioestimulantes, bioinseticidas, bionematicidas e agentes de controle biológico de pragas e doenças (Souza et al., 2022). Apesar da diversidade de formulações já disponíveis no mercado, ainda não há um produto de uso comercial com função bioherbicida, o que representa uma lacuna relevante considerando os impactos das plantas daninhas sobre a produtividade agrícola. Nesse sentido, o desenvolvimento de bioherbicidas tem emergido como uma fronteira promissora de pesquisa, capaz de integrar estratégias de manejo sustentável e reduzir a dependência de herbicidas sintéticos (Macías et al., 2019).

No Brasil, grupos de pesquisa vêm avançando nessa direção. No Laboratório de Plantas Daninhas (LAPDA), por exemplo, têm sido conduzidos estudos explorando o potencial fitotóxico de extratos e óleos essenciais de plantas com propriedades alelopáticas, investigando sua ação sobre a germinação e o crescimento inicial de espécies infestantes. Entre as plantas investigadas, destacam-se espécies aromáticas e medicinais, cujos metabólitos secundários apresentam efeitos inibitórios consistentes, reforçando sua viabilidade como fontes de novos bioherbicidas. Esses estudos se inserem em uma tendência global de valorização da alelopatia como base científica para o desenvolvimento de insumos agrícolas mais sustentáveis (Rice, 2012; Macías et al., 2019).

Portanto, embora o Brasil já ocupe posição de liderança no mercado de bioinsumos, há desafios e oportunidades significativas para ampliar o portfólio de produtos disponíveis, especialmente no que se refere ao controle de plantas daninhas. A integração de bioherbicidas ao manejo agrícola representaria não apenas um avanço científico, mas também um passo decisivo para consolidar sistemas de produção mais resilientes e ambientalmente responsáveis.

## **2.5. Alelopatia**

A alelopatia constitui-se como uma área de estudo que tem ganhado crescente relevância nas últimas décadas, especialmente pela sua aplicação potencial no manejo sustentável de plantas daninhas e na redução da dependência de herbicidas sintéticos. Segundo a International Allelopathy Society (IAS), a definição mais abrangente descreve a alelopatia como “a ciência que estuda qualquer processo que envolva metabólitos secundários produzidos por plantas, algas, bactérias e fungos que influenciem o crescimento e o desenvolvimento de

sistemas agrícolas e biológicos” (IAS, 1996). Essa definição amplia a compreensão do fenômeno, que não se restringe apenas a interações negativas (inibição), mas também contempla efeitos positivos, como estímulos ao crescimento ou à resistência das plantas receptoras.

Os compostos aleloquímicos envolvidos nesses processos pertencem a diversas classes de metabólitos secundários, como fenóis, terpenoides, alcaloides e flavonoides, que podem ser liberados no ambiente por diferentes vias, incluindo exsudação radicular, lixiviação foliar, volatilização ou decomposição de resíduos vegetais (Rice, 2012; Macías et al., 2019). A presença desses compostos no solo ou na atmosfera pode alterar a germinação de sementes, o desenvolvimento radicular e a dinâmica competitiva entre espécies cultivadas e infestantes.

No contexto do manejo agrícola, a alelopatia tem despertado grande interesse como alternativa ou complemento às práticas convencionais de controle de plantas daninhas. Evidências experimentais demonstram que espécies como *Sorghum bicolor* (sorgo), *Helianthus annuus* (girassol) e *Cymbopogon citratus* (capim-limão) liberam compostos com atividade fitotóxica significativa, capazes de reduzir a germinação e o crescimento inicial de espécies invasoras (Macías et al., 2019). Tais resultados têm estimulado o desenvolvimento de bioherbicidas à base de extratos vegetais ou óleos essenciais, os quais podem ser incorporados em programas de manejo integrado.

Embora a ciência da alelopatia ainda enfrente desafios metodológicos, como a variabilidade de respostas entre espécies receptoras e a influência de fatores ambientais sobre a eficácia dos aleloquímicos, o seu potencial é inegável. Além de contribuir para o controle de plantas daninhas, estudos recentes indicam que processos alelopáticos podem desempenhar papel importante na diversificação de sistemas de cultivo, na ciclagem de nutrientes e até mesmo no estímulo de mecanismos de defesa das plantas cultivadas (Gniazdowska e Bogatek, 2005).

O interesse pela alelopatia tem crescido especialmente no contexto do manejo de plantas daninhas. Espécies cultivadas e espontâneas são capazes de produzir e liberar aleloquímicos por diferentes vias, como exsudação radicular, volatilização de óleos essenciais, lixiviação de compostos foliares ou decomposição de resíduos orgânicos (Rice, 2012). Esses compostos podem alterar a germinação, reduzir a taxa de crescimento inicial e interferir na absorção de nutrientes das

plantas receptoras, oferecendo assim um potencial mecanismo natural de supressão de espécies invasoras (Macías et al., 2019).

Diversos estudos demonstram resultados promissores. Culturas como a do sorgo, do girassol e de espécies aromáticas, como o capim-limão apresentam compostos voláteis e solúveis com efeito inibitório sobre plantas infestantes de relevância agrícola (Souza et al., 2022). Esse potencial tem incentivado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de bioherbicidas, os quais poderiam integrar estratégias de manejo integrado de plantas daninhas, reduzindo a dependência de herbicidas sintéticos e alinhando-se às exigências de sustentabilidade do setor agrícola.

Entretanto, desafios ainda precisam ser superados. A eficácia dos compostos alelopáticos pode variar de acordo com fatores ambientais, como temperatura, umidade e características do solo, além da suscetibilidade diferencial entre espécies receptoras (Gniazdowska & Bogatek, 2005). Além disso, a escalabilidade da produção e a formulação estável de bioherbicidas à base de extratos ou óleos essenciais permanecem como barreiras técnicas a serem resolvidas antes da adoção em larga escala.

Apesar dessas limitações, a alelopatia representa um campo de inovação científica com grande aplicabilidade prática. Ao integrar princípios ecológicos e fisiológicos com o desenvolvimento de novos bioinsumos, ela abre caminho para sistemas agrícolas mais resilientes e menos dependentes de químicos sintéticos. Assim, a ciência da alelopatia não apenas contribui para o controle de plantas daninhas, mas também reforça a transição rumo a modelos de produção agrícola sustentáveis, com potencial de impacto positivo tanto na produtividade quanto na conservação ambiental.

Assim, a alelopatia vem se consolidando como uma ciência estratégica, que alia fundamentos ecológicos à inovação tecnológica. Ao integrar conhecimentos químicos, fisiológicos e agronômicos, ela se posiciona como um dos pilares para o avanço da agricultura sustentável, fornecendo bases para o desenvolvimento de bioinsumos e novas práticas de manejo que conciliem produtividade e conservação ambiental.

## **2.6. *Synedrellopsis grisebachii***

*Synedrellopsis grisebachii* Hieron. & Kuntze é uma planta herbácea perene e prostrada da família Asteraceae, nativa de regiões da América do Sul como Argentina, Bolívia e Paraguai. Bastante frequente no Brasil, apresenta notável desenvolvimento vegetativo e grande capacidade competitiva, dominando facilmente gramíneas forrageiras, especialmente em solos arenosos, embora também já seja observada em Argissolos no norte do Paraná. Sua classificação taxonômica é:

Reino: Plantae

Clado: Angiospermas (plantas com flores)

Clado: Eudicotiledôneas

Clado: Asterídeas

Ordem: Asterales

Família: Asteraceae

Gênero: *Synedrellopsis*

Espécie: *Synedrellopsis grisebachii* Hieron. ex Griseb.

A espécie apresenta hábito perene, com tendência a formação de touceiras ou estolões, folhas opostas, ovadas e pubescentes em ambas as faces, e capítulos axilares característicos das compostas, com aquênios sem alas e papus formado por duas aristas.

Ocorre no Brasil, principalmente no Centro-Oeste e Centro-Sul, Bolívia, Paraguai e norte da Argentina e, revela forte plasticidade ecológica, adaptando-se tanto a pleno sol quanto a sombreamento.

Em sistemas pastoris e agrícolas brasileiros, *S. grisebachii* mostra elevada competitividade frente às gramíneas forrageiras e destaca-se por sua tolerância a herbicidas amplamente usados, como o glyphosate, exigindo doses elevadas ou herbicidas alternativos para controle eficiente. Estudos indicam, por exemplo, que a aplicação de 1.334 g ha<sup>-1</sup> de triclopyr foi necessária para controle total em estágio reprodutivo, enquanto a eficácia do glyphosate variou segundo o estágio de desenvolvimento e condição de luminosidade, sendo menor em plantas sob pleno sol ou em fase reprodutiva, o que confere à espécie um perfil de planta daninha de difícil manejo em pastagem e sucessão agrícola.

Planta perene (relatada como vivaz/em touceira), com órgãos aéreos providos de capítulos típicos de Asteraceae. As lâminas foliares têm variação

morfológica observada entre estágios de desenvolvimento; estudos técnicos descrevem aumento relativo de tecidos esclerenquimáticos e de feixes vasculares em fases reprodutivas (Giancotti et al., 2012).

*Synedrellopsis grisebachii* é considerada uma planta daninha relevante em pastagens e sistemas agrícolas no Brasil; vários estudos aplicados avaliaram germinação, controle pós-emergente e sensibilidade a herbicidas (incluindo estudos sobre tolerância/natural resistência ao glyphosate) (Giancotti et al., 2012). Em termos fitossanitários, é considerada uma planta daninha importante, adaptada a infestações em diversas culturas extensivas, como algodão, arroz, cana-de-açúcar, café, feijão, soja, entre outras, em que se comporta como invasora de difícil manejo (Giancotti et al., 2012).

Além disso, estudos sobre controle químico demonstram que essa espécie é altamente tolerante a herbicidas como glyphosate e paraquat durante seu período reprodutivo, enquanto o triclopyr, especialmente em doses elevadas ( $1\ 334\text{ g ha}^{-1}$ ), mostrou-se eficaz para controle total; doses intermediárias desse mesmo herbicida ( $150\text{ a }667\text{ g ha}^{-1}$ ) também reduziram a viabilidade e velocidade de germinação dos aquênios, com glyphosate e paraquat não apresentando efeitos sobre esses aspectos de reprodução.





**Fotos 1:** a) Vista geral da planta; b) Detalhe de um ramo; c) Detalhe aproximado mostrando as folhas e sua disposição; d) Detalhe da inserção dos frutos; e) Detalhe dos aquênios. Fotos adaptadas de Moreira e Bragança (2011).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Plantas de agriãozinho foram coletadas na área de gramado (cerca de 90 hectares) da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal - (21°14'37.41"S e 48°17'54.84"W). Na sequência, houve a separação da parte aérea e radicular, que foram colocadas para secar em estufa a 40°C por de 3 dias, ou até atingirem massa constante. Decorrido este tempo, os materiais secos foram moídos em micro moinho tipo Wiley (peneira 60 mesh) e colocados em câmara fria (11°C).

Os materiais moídos foram submetidos à extração com solventes orgânicos de polaridades crescentes (diclorometano e acetato de etila), seguida do fracionamento de forma a obter as frações majoritárias, seguindo o procedimento descrito por Silva (2017).

Foram avaliados os parâmetros físicos e químicos para verificar e isolar seus possíveis efeitos nas diversas concentrações do extrato das plantas estudadas. As análises foram de: pH, osmolalidade (mosmol/kg), teor de sólidos solúveis (°Brix) e condutividade elétrica (μS/cm).

#### 3.1. Bioensaio de citotoxicidade: coleóptilo de trigo

Sementes de trigo (*Triticum aestivum* L.) foram colocadas para germinar sobre papel Whatman nº1 em placas de Petri, umedecidas com água destilada e mantidas em câmara de germinação a  $\pm 25$  °C, em condições de escuro completo

(Hancock et al., 1964). As sementes foram umedecidas diariamente até decorridas 72 horas e, após isto, os fragmentos de coleóptilos de cinco milímetros de comprimento foram cortados imediatamente após os primeiros dois milímetros do ápice do coleóptilo, em guilhotina Van der Weij, sendo todo o processo realizado sob luz de segurança verde (Nitsch e Nitsch, 1956). As frações isoladas foram pré-dissolvidas em dimetilsulfóxido (0,1%) e diluídas em solução tampão citrato/fosfato pH 5.6, complementada com sacarose a 2% (Nitsch e Nitsch, 1956) e diluídas para as concentrações finais de 800, 400, 200, 100 e 50 ppm para os extratos. Como controles, foram utilizadas a solução tampão pura acrescida de dimetilsulfóxido (controle negativo) e solução tampão contendo herbicida de referência (0,6% metsulfuron-metílico - controle positivo) (Macías et al, 2000). Cinco fragmentos de coleóptilos de 5 mm, foram incubados em tubos de ensaio contendo 2mL de extratos diluídos e solução controle positiva e negativa. Esse ensaio foi executado em triplicata, ou seja, três tubos para cada solução avaliada. Os tubos foram devidamente etiquetados, selados e incubados com agitação constante (6 rpm), em um rotor de cultivo, em condições de escuro, a uma temperatura de 25 ( $\pm$ 1) °C durante 24 horas. Transcorrido este período, o aumento ou redução, em longitude do coleóptilo, foram analisados (Martín e Luna, 2004).

### **3.2. Bioensaio de fitotoxicidade**

Sementes foram colocadas sobre papel Whatman n°1 (acondicionadas em placas de Petri com 50 mm de diâmetro) e umedecidas com 1,0 mL da solução teste tamponada (tampão de ácido 2-[Nmorfolino]etanosulfônico – MES, 10 mM, com pH ajustado para 6,0). As diluições das frações, e os tratamentos controle foram os mesmos utilizados para o bioensaio de coleóptilos de trigo. Como plantas testes foram utilizadas STS (“Standard Target Species”) (Macías et al., 2000). Como STS foram utilizadas a eudicotiledônea *Lactuca sativa* L. (alface) e a monocotiledônea *Sorghum bicolor* L. (sorgo); e como planta daninha, a eudicotiledônea *Portulaca oleracea* L. (beldroega).

Depositaram-se 20 sementes por placa, em quadruplicatas, sendo que cada placa representa uma repetição. Após a semeadura, as placas de Petri foram vedadas hermeticamente com Parafilm® e acondicionadas na câmara de germinação regulada para 25°C, em condição de obscuridade, onde foram mantidas



por períodos que variaram com a espécie, a saber: alface (6 dias), sorgo (7 dias) e beldroega (6 dias).

Ao término destes períodos, as placas foram transferidas para um congelador, onde permaneceram por, no mínimo, 24 horas, para evitar o crescimento das plântulas e, posteriormente, favorecer a manipulação destas durante o processo de medida (Castellano, 2002). Para mensuração do comprimento da parte aérea e da raiz, as placas foram retiradas do congelador e as plântulas descongeladas foram esticadas sobre uma folha milimétrica plastificada, na qual foram determinados os comprimentos.

### **3.3. Ensaio de despigmentação em *Lemna minor***

Frondes saudáveis de *Lemna minor* (L.) Griff foram selecionadas e aclimatadas previamente em meio de cultivo com solução nutritiva completa de Hoagland diluída na proporção de 1/10, e, mantidas sob condições controladas de luminosidade, temperatura ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$ ) e fotoperíodo de 12 horas de luz e 12 horas de escuro. Para o experimento, cinco frondes foram transferidas para placas de Petri de 3 cm de diâmetro, contendo 5mL de solução de extrato de agriãozinho nas concentrações de 200, 400 e 800 ppm.

As exposições foram realizadas por 24 horas, sob as mesmas condições ambientais padronizadas. Como controle negativo, utilizou-se apenas a solução completa de Hoagland diluída (1/10). Após o período de incubação, as frondes foram inspecionadas visualmente quanto à despigmentação e coloração anormal, sendo os resultados documentados fotograficamente. A análise qualitativa considerou a intensidade do clareamento ou necrose dos tecidos foliares, relacionada ao aumento da concentração do extrato (Lockhart et al., 1989).

### **3.4. Análises estatísticas**

As análises estatísticas dos bioensaios foram realizadas por meio da linguagem de programação Python (Python: versão 3.10), utilizando as bibliotecas Pandas (para organização e manipulação dos dados), NumPy (para cálculos numéricos), SciPy (para realização dos testes estatísticos), e Statsmodels (para análise de variância - ANOVA e comparação de médias). As diferenças entre os tratamentos foram avaliadas por meio de ANOVA seguida do teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), visando identificar diferenças estatisticamente significativas entre as

concentrações do extrato. A visualização gráfica dos resultados foi conduzida com a biblioteca Matplotlib, com complementos de estilização pelo Seaborn, permitindo representação clara dos efeitos observados em cada bioensaio. Os gráficos foram gerados no software OriginPro (OriginLab. Version 2018, Northampton, MA, USA).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A família Asteraceae é reconhecida por sua elevada diversidade fitoquímica, sendo uma das mais estudadas quanto ao potencial alelopático e farmacológico de suas espécies. Seus membros produzem compostos secundários com ampla gama de atividades biológicas, incluindo fenóis, lactonas sesquiterpênicas, flavonoides e terpenos, os quais possuem propriedades citotóxicas, antimicrobianas e fitotóxicas bem documentadas (Duke et al., 2006).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros físico-químicos do extrato de agriãozinho, em diferentes concentrações, bem como da solução tampão utilizada como controle negativo, com o objetivo de assegurar que essas variáveis estivessem dentro de faixas compatíveis com a germinação e o desenvolvimento inicial das espécies receptoras, permitindo isolar o efeito físicos dos extratos a serem estudados. Os dados obtidos indicam que não houve variações relevantes entre os tratamentos que pudessem justificar alterações fisiológicas observadas nos bioensaios, validando a neutralidade do meio quanto à interferência físico-química.

Desta forma, os resultados apresentados adiante são respostas a uma possível interação de inibição/estímulo gerados exclusivamente por grupos químicos presentes no extrato do agriãozinho.

**Tabela 1** – Caracterização físico-química (pH, osmolalidade, teor de sólidos solúveis e condutividade elétrica) obtidos para cada tratamento dos extratos de *Synedrellopsis grisebachii* (agriãozinho) em diferentes concentrações (ppm) e da solução tampão controle.

	<b>pH</b>	<b>Osmolalidade (mosmol/kg)</b>	<b>Brix (%)</b>	<b>Condutividade (uS/cm)</b>
<b>Controle</b>	5.50	145	0.1	2080
<b>12.5 ppm</b>	5.67	148	0.4	2090
<b>25 ppm</b>	5.81	149	1,0	2030
<b>50 ppm</b>	5,77	142	1.05	2060
<b>100 ppm</b>	5.95	141	1.05	2080
<b>200 ppm</b>	6.14	147	1.2	2080

<b>400 ppm</b>	6.06	156	1.9	2080
<b>800 ppm</b>	5.90	148.5	0.9	2060

---

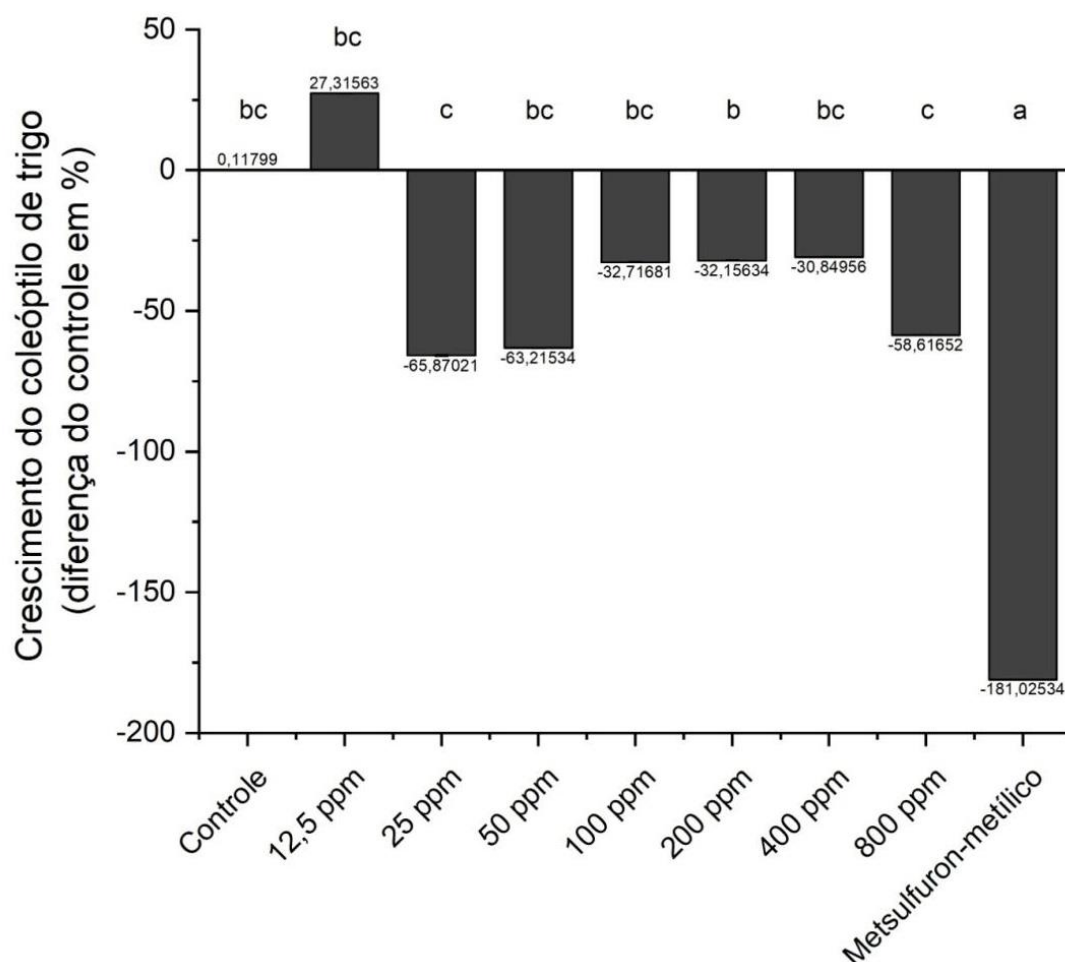
#### 4.1. Citotoxicidade

O estágio fenológico da planta doadora é um fator extremamente importante para analisar o impacto do grau de ação por efeito alelopático. Sendo assim, dependendo do estágio fenológico da planta, a mesma pode produzir diferentes compostos aleloquímicos ou produzir em diferentes concentrações dos químicos, modulando diretamente o grau de interferência (Scheffer-Basso et al., 2019).

Para minimizar tal efeito, os extratos utilizados são provenientes de plantas no estágio vegetativo. Normalmente, espera-se que a maior produção de metabólitos secundários seja no estágio vegetativo (Omezzine et al., 2014), no qual foram os momentos em que houve a coleta de plantas de agriãozinho. Na Figura 2, observa-se que há diferentes respostas à utilização do extrato no ensaio de citotoxicidade.

Na menor concentração testada (12,5 ppm), houve um estímulo de aproximadamente 27%, com aumento no comprimento dos coleótilos em comparação ao controle e aos demais tratamentos, indicando um efeito benéfico. Dessa forma, além do efeito negativo já esperado, é provável que o efeito observado seja dependente da concentração do extrato, sendo a resposta mais parcimoniosa.

Tal padrão é compatível com o fenômeno conhecido como hormese, no qual baixas doses de substâncias potencialmente tóxicas induzem efeitos fisiológicos benéficos, enquanto doses elevadas resultam em inibição (Duke et al., 2006; Calabrese, 2008). Efeitos opostos também podem ocorrer, mas são extremamente raros.



**Figura 2** - Efeito do extrato de *Synedrellopsis grisebachii* (agriãozinho) sobre o alongamento de coleóptilos de *Triticum aestivum* (trigo), em diferentes concentrações (ppm). (Obs: valores expressos como diferença percentual do controle; médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade).

As concentrações utilizadas entre 25 ppm e 800 ppm apresentaram um elevado potencial de citotoxicidade, já que as mesmas foram capazes de reduzir significativamente (~30 a 65%) o tamanho do tecido analisado quando comparado com o controle negativo. Além disso, ao comparar com o controle positivo, no qual é utilizado o herbicida comercial metsulfuron-metílico na dose padrão, obteve-se cerca de 30% da resposta do herbicida (Figura 2).

Como descrito anteriormente, o agriãozinho produz compostos, tais como: fenólicos, lactonas sesquiterpênicas, taninos, saponinas, alcaloides e alguns esteroides (Hernández et al., 1996; Bejo, 2005; Barros et al., 2009). As lactonas sesquiterpênicas, em particular, têm sido amplamente associadas à inibição do crescimento celular em plantas por atuarem sobre microtúbulos, DNA e proteínas essenciais à divisão celular (Picman, 1986; Silva et al., 2017). Além disso,

saponinas em altas concentrações são descritas como agentes promotores de lise celular e alterações de permeabilidade de membranas, o que pode contribuir significativamente para os efeitos citotóxicos observados (Pereira et al., 2016).

Desta forma, pelo padrão observado nos resultados, essas duas substâncias se caracterizam como as possíveis principais responsáveis por causar tal efeito. Espera-se, em estudos de toxicidade dose-dependente, que o aumento da concentração de um agente bioativo resulte em intensificação dos efeitos inibitórios (Duke et al, 2006; Calabrese, 2008). No entanto, os dados observados na Figura 2 revelam um comportamento não linear entre as concentrações de 25 a 800 ppm, sem tendência clara de aumento progressivo da inibição. Esse padrão sugere que o efeito citotóxico dos extratos de agriãozinho pode não ser puramente dependente da concentração, mas sim associado à saturação de receptores biológicos, à presença de compostos antagonistas ou à instabilidade química de determinados aleloquímicos em concentrações elevadas.

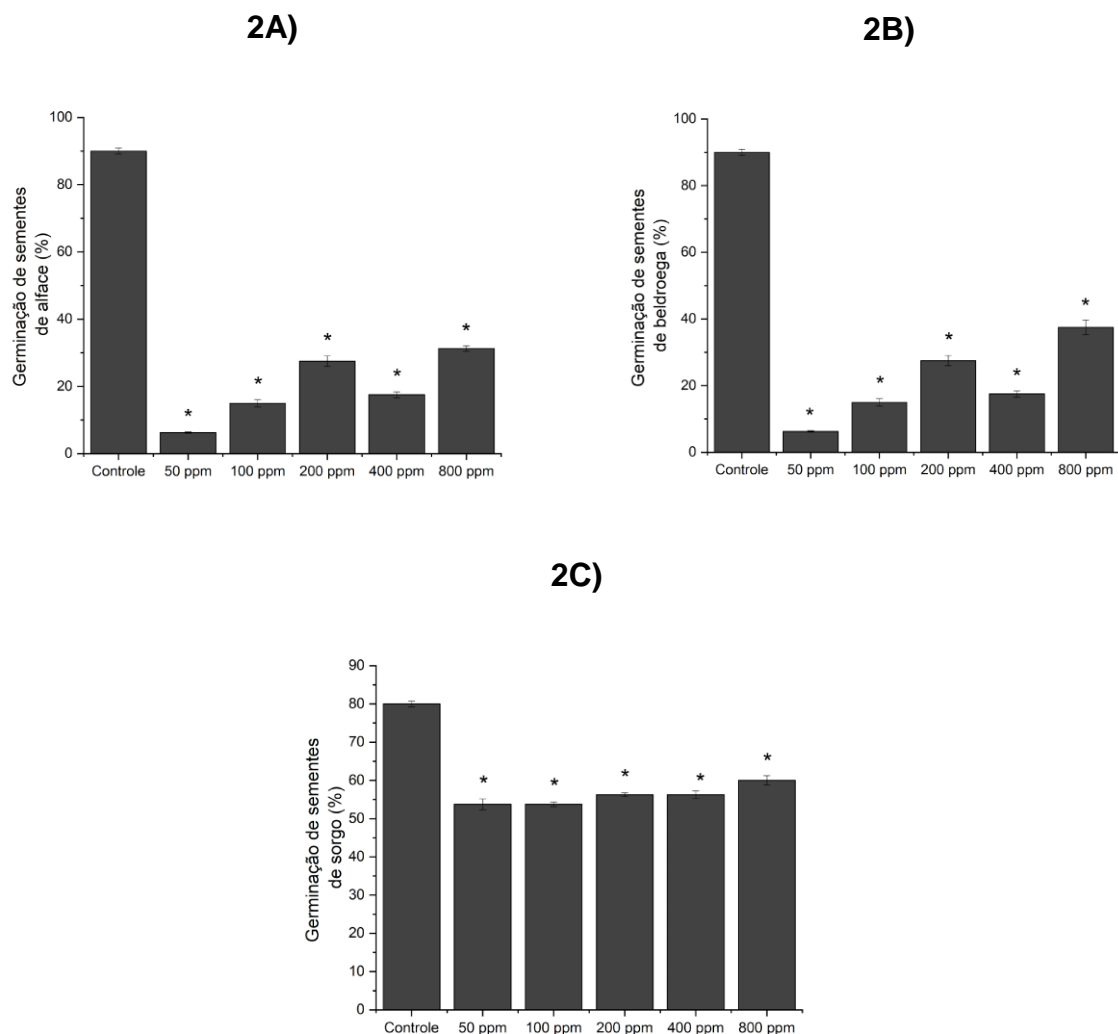
Tais fenômenos são recorrentes em extratos vegetais complexos, nos quais múltiplos compostos interagem de forma sinérgica ou antagônica, modulando a resposta biológica de maneira não previsível por modelos univariados (Rice, 2012). Assim, é plausível considerar que, a partir de um determinado limiar (neste caso, 25 ppm), a presença de compostos ativos seja suficiente para desencadear o efeito citotóxico máximo possível no modelo experimental adotado, independentemente de aumentos subsequentes na concentração total do extrato.

#### **4.2. Fitotoxicidade**

Embora ainda não existam estudos específicos abordando os efeitos de extratos de agriãozinho sobre a taxa de germinação de sementes, os resultados obtidos no presente estudo (Figura 3: a – *Lactuca sativa*, b – *Portulaca oleracea*, c – *Sorghum bicolor*) sugerem que os metabólitos secundários presentes no extrato interferem negativamente nos processos germinativos dessas espécies.

Entretanto, com base em pesquisas de outras espécies de Asteraceae, pode-se inferir que a presença de alguns compostos como: ácidos fenólicos - conhecidos por inibir a germinação e o crescimento de plântulas através da inibição de enzimas associadas à mobilização de reservas e pela geração de estresse oxidativo nas células embrionárias (Weir et al., 2004); flavonóides - responsáveis por interferir na divisão celular e na elongação radicular; lactonas sesquiterpênicas - que estão

associadas a afetar a fotossíntese e a respiração celular (Macías et al., 2019) e; alcaloides - compostos que podem afetar negativamente a síntese de proteínas e a atividade enzimática essencial para a germinação das sementes (Kostina-Bednarz et al., 2023), sejam responsáveis pelos resultados obtidos.



**Figura 3** – Efeito do extrato de *Synedrellopsis grisebachii* sobre a germinação de sementes. A taxa de germinação foi expressa em comparação ao controle para três espécies: (a) *Lactuca sativa* (alface), (b) *Portulaca oleracea* (beldroega) e (c) *Sorghum bicolor* (sorgo). Os valores representam médias  $\pm$  erro padrão. Asteriscos (\*) indicam diferenças estatisticamente significativas em relação ao controle, segundo o teste de Tukey, com  $p < 0,05$ .

No meio natural, esses compostos são frequentemente liberados no ambiente por meio de exsudação radicular, lixiviação de partes aéreas ou decomposição de resíduos vegetais, afetando negativamente a germinação de

sementes sensíveis e constituindo uma estratégia competitiva altamente eficaz em ecossistemas naturais e cultivados (Inderjit e Weston, 2000).

A Figura 3 apresenta valores significativos entre todas as concentrações utilizadas (50-800 ppm) comparado com o controle para as três espécies utilizadas. Entretanto, quando comparado entre as espécies, é possível visualizar que *Sorghum bicolor* (Figura 3-c) apresentou maior tolerância aos compostos presentes nos extratos.

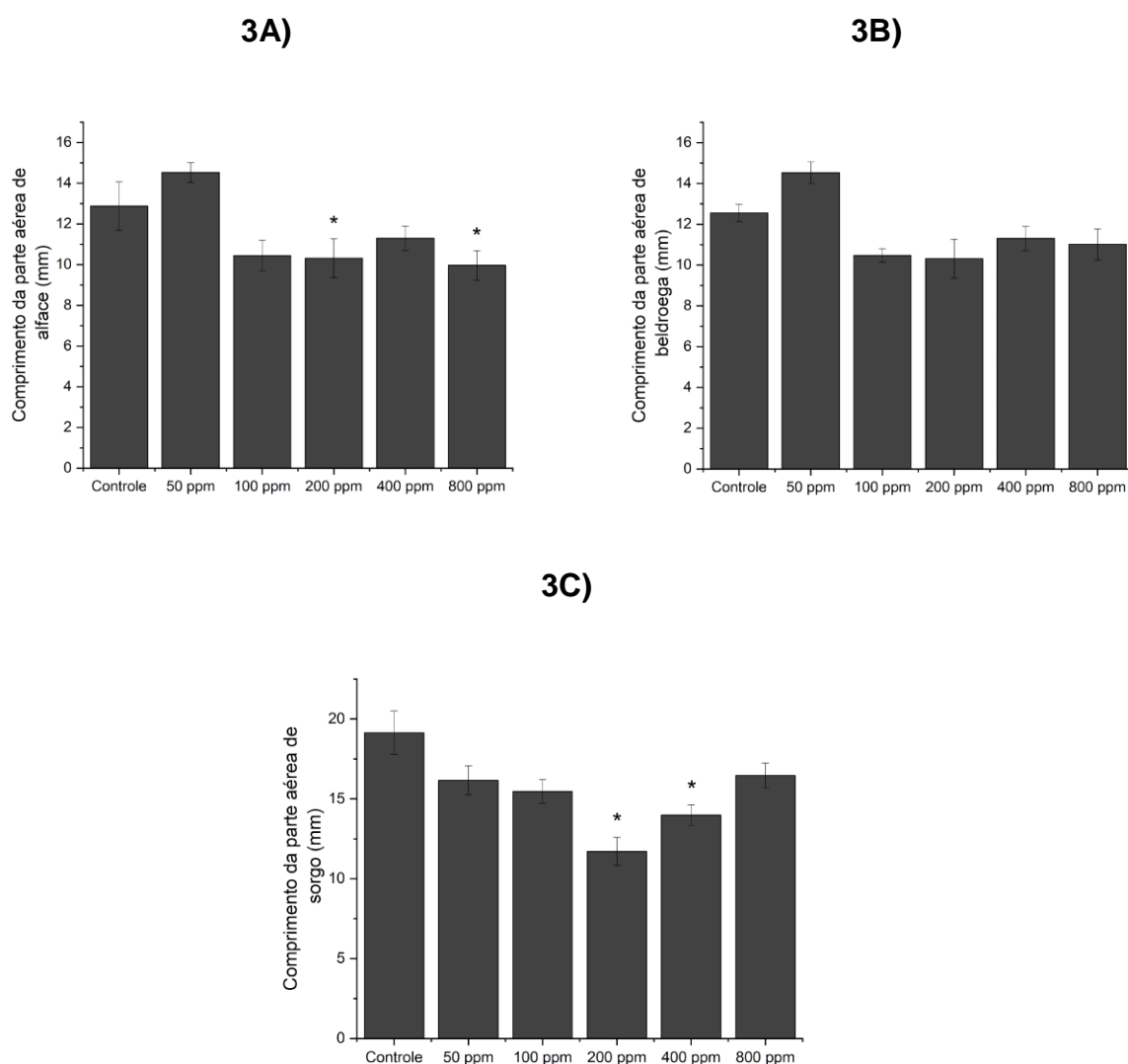
#### **4.3. Fitotoxicidade: efeito na parte aérea das plântulas**

Compostos aleloquímicos secundários, como fenóis, flavonoides e lactonas sesquiterpênicas, são conhecidos por exercerem efeitos fitotóxicos sobre diferentes estágios do desenvolvimento vegetal, incluindo alterações morfofisiológicas, como a redução do crescimento da parte aérea e radicular, espessamento de tecidos e interferência em processos hormonais e enzimáticos (Duke et al., 2006; Macías et al., 2019; Kostina-Bednarz et al., 2023).

No presente estudo, os efeitos do extrato de agriãozinho sobre a germinação foram significativos e, para as plântulas germinadas, observou-se que a parte aérea também foi significativamente afetada em determinadas condições (Figura 4). Para alface, houve inibição significativa do crescimento da parte aérea nas concentrações de 200 e 800 ppm, enquanto o sorgo apresentou reduções evidentes a 200 e 400 ppm. Tais resultados indicam uma resposta espécie-específica e dose-dependente, com possível envolvimento de diferentes vias metabólicas sensíveis ao extrato. Os mecanismos prováveis incluem inibição da síntese de auxinas e giberelinas, danos a membranas celulares e redução da atividade mitocondrial, processos já descritos em estudos com lactonas sesquiterpênicas e flavonoides (Weir et al., 2004; Saha et al., 2018).

Por outro lado, a beldroega não apresentou alterações significativas no desenvolvimento da parte aérea, o que pode estar associado à sua reconhecida tolerância a ambientes estressantes, bem como à presença de metabólitos endógenos antioxidantes e mecanismos eficazes de detoxificação (Ghorani et al., 2023). Esta espécie é rica em compostos, como ácido ascórbico, betalaínas e glutathione, os quais podem neutralizar o estresse oxidativo induzido por aleloquímicos, protegendo a integridade dos tecidos meristemáticos e foliares (Ghorani et al., 2023; Li et al., 2024).

Deve-se considerar, ainda, que as análises da parte aérea foram realizadas sobre um número restrito de plântulas, devido à própria inibição germinativa promovida pelo extrato. Isso limita a robustez estatística das observações, mas não invalida a tendência biológica identificada, reforçando a necessidade de investigações complementares com maior número de repetições e espécies.



**Figura 4** – Efeito do extrato de *Synedrellopsis grisebachii* sobre o crescimento da parte aérea. O crescimento da parte aérea das plântulas está em comparação ao controle para três espécies: (a) *Lactuca sativa* (alface), (b) *Portulaca oleracea* (beldroega) e (c) *Sorghum bicolor* (sorgo). Os valores representam médias  $\pm$  erro padrão. Asteriscos (\*) indicam diferenças estatisticamente significativas em relação ao controle, segundo o teste de Tukey, com  $p < 0,05$ .

A análise dos dados também permite a consideração de fatores complementares que ajudam a explicar a resposta diferencial entre as espécies



testadas. Em primeiro lugar, destaca-se o efeito potencial da diferença morfofisiológica entre monocotiledôneas e eudicotiledôneas, sendo estas últimas geralmente mais suscetíveis à penetração de compostos hidrofílicos, devido a tecidos epidérmicos menos cutinizados e ao menor grau de lignificação (Inderjit e Callaway, 2003). Em segundo lugar, a ausência de efeito significativo em beldroega pode estar relacionada à sua alta plasticidade fisiológica e à presença de antioxidantes naturais como betalaínas, ácido ascórbico e glutatona, que promovem proteção contra estresses oxidativos e xenobióticos (Dayan et al., 2019). Adicionalmente, deve-se considerar o possível envolvimento de estresse oxidativo induzido por aleloquímicos, especialmente fenóis e lactonas sesquiterpênicas, que afetam a homeostase redox celular, levando a danos estruturais mesmo na parte aérea (Macías et al., 2019).

Outro aspecto relevante é a hipótese de saturação de sítios fisiológicos específicos, como transportadores de membrana, enzimas-chave do metabolismo energético ou receptores hormonais, o que explicaria a ausência de correlação linear dose-resposta, observada em concentrações mais elevadas (Dayan et al., 2019). Por fim, a composição complexa dos extratos vegetais brutos implica a presença de múltiplos compostos com efeitos sinérgicos, aditivos ou antagonistas, cuja interação pode modular de forma não linear a resposta biológica, como amplamente discutido por Duke et al. (2006). A integração desses fatores reforça a complexidade envolvida na avaliação da atividade fitotóxica de extratos vegetais, e destaca a necessidade de investigações futuras focadas na caracterização individual dos metabólitos ativos, bem como nos mecanismos fisiológicos e moleculares das espécies-alvo.

Em relação à beldroega, pesquisas indicam que esta espécie pode apresentar resistência a certos compostos alelopáticos. Por exemplo, um estudo avaliou o efeito de extratos de híbridos de sorgo e capim-sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf) sobre a germinação de sementes de beldroega e concluiu que, embora o crescimento das plântulas tenha sido afetado, a porcentagem de germinação não sofreu inibição significativa.

#### **4.4. Fitotoxicidade: efeito na parte radicular**

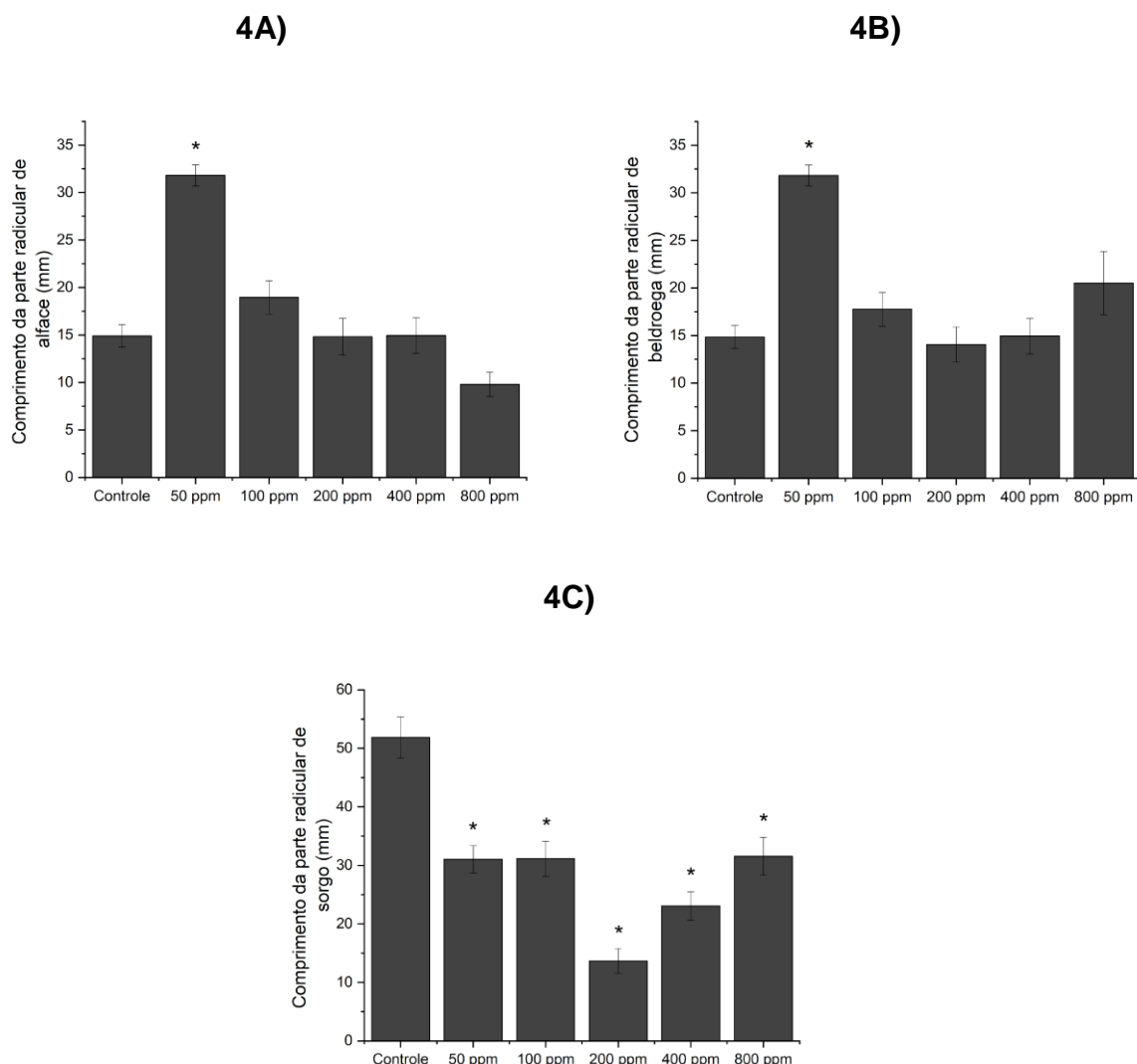
Em contraste com os efeitos observados na parte aérea das plântulas, a análise radicular revelou um padrão de resposta mais acentuado em sorgo, cuja

inibição foi estatisticamente significativa em todas as concentrações testadas do extrato de agriãozinho (Figura 5). Esse comportamento sugere uma elevada sensibilidade do sistema radicular do sorgo aos compostos aleloquímicos presentes no extrato, possivelmente relacionados à inibição da divisão celular nas regiões meristemáticas, à disfunção mitocondrial e ao comprometimento da elongação radicular — mecanismos já descritos para lactonas sesquiterpênicas e fenóis em gramíneas (Macías et al., 2019; Saha et al., 2018; Duke et al., 2006).

De forma interessante, a alface e beldroega apresentaram comportamento contrastante: não apenas mantiveram o crescimento radicular em níveis similares ao controle em quase todas as concentrações, como também demonstraram estímulo significativo do crescimento na concentração de 50 ppm, com um aumento de aproximadamente 100% no comprimento das raízes em relação ao grupo controle (Figura 5). Esse tipo de resposta é característico do fenômeno de hormese, no qual baixas doses de substâncias potencialmente tóxicas induzem efeitos fisiológicos positivos, como aumento de crescimento, proliferação celular e ativação de vias antioxidantes (Calabrese e Baldwin, 2003; Duke et al., 2006).

A hormese induzida por aleloquímicos já foi descrita em diversas espécies, inclusive em alface, quando exposta a baixas concentrações de ácidos fenólicos ou flavonoides, que podem atuar como reguladores secundários do crescimento, promovendo a sinalização de auxinas ou a ativação de rotas redox relacionadas à elongação celular (Weir et al., 2004; Li et al., 2024). No caso da beldroega, seu histórico de tolerância a ambientes com plasticidade química e sua capacidade antioxidante endógena (como já discutido anteriormente) podem contribuir para sua habilidade de metabolizar ou até utilizar determinados compostos do extrato como sinais de crescimento adaptativo, especialmente em concentrações subinibitórias.

A diferença entre a resposta das raízes de monocotiledôneas (sorgo) e eudicotiledôneas (alface e beldroega) também pode ser explicada por diferenças anatômicas e fisiológicas entre os grupos, incluindo a arquitetura radicular, a composição da parede celular e a expressão diferencial de transportadores de aleloquímicos (Rice, 2012; Scavo et al., 2021). Tais resultados reforçam o caráter espécie-específico da ação alelopática do extrato de agriãozinho e sugerem a presença de compostos com propriedades horméticas em determinadas concentrações.



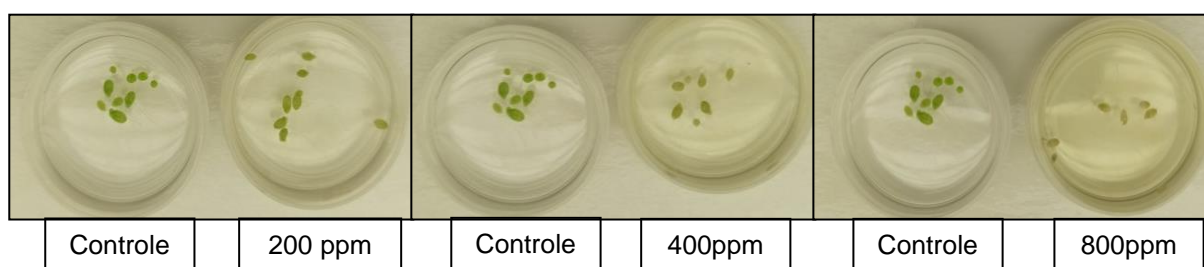
**Figura 4** – Efeito do extrato de *Synedrellopsis grisebachii* sobre o crescimento radicular. O crescimento da raiz das plântulas está em comparação ao controle para três espécies: (a) *Lactuca sativa* (alface), (b) *Portulaca oleracea* (beldroega) e (c) *Sorghum bicolor* (sorgo). Os valores representam médias  $\pm$  erro padrão. Asteriscos (\*) indicam diferenças estatisticamente significativas em relação ao controle, segundo o teste de Tukey, com  $p < 0,05$ .

#### 4.5. Resposta de *Lemna minor* à exposição ao extrato de agriãozinho

A exposição de *Lemna minor* ao extrato de agriãozinho resultou em despigmentação visível nas frondes após 24 horas, com intensidade crescente conforme o aumento da concentração do extrato, especialmente nas doses de 400 e 800 ppm (Figura 6). Esse efeito pode ser atribuído à presença de aleloquímicos capazes de interferir no metabolismo de pigmentos fotossintéticos, como as lactonas sesquiterpênicas e os ácidos fenólicos descritos anteriormente nesta espécie (Hernández et al., 1996; Macías et al., 2019).

A despigmentação em *L. minor* está frequentemente associada à degradação da clorofila e de carotenoides, causada por estresse oxidativo ou por inibição de enzimas-chave envolvidas na biossíntese de pigmentos, como a protochlorophyllide oxidoreductase e a  $\delta$ -aminolevulinato sintase (Kostina-Bednarz et al., 2023). Esse efeito é comum em compostos com atividade herbicida que atuam sobre o sistema fotossintético ou promovem disfunção mitocondrial e ruptura de membranas celulares (Dayan, 2019).

A resposta dose-dependente observada (200–800 ppm) reforça a hipótese de que o extrato contém moléculas bioativas com potencial de causar interferência direta na maquinaria fotossintética, afetando a integridade dos tilacoides e a atividade dos fotossistemas, como descrito em bioensaios com aleloquímicos naturais de outras Asteraceae (Scavo et al., 2019).



**Figura 6** – Efeito do extrato de *Synedrellopsis grisebachii* sobre frondes de *Lemna minor*, sendo: controle negativo (solução completa de Hoagland); (a) extrato a 200 ppm; (b) extrato a 400 ppm; (c) extrato a 800 ppm.

O uso de *L. minor* como organismo-teste é amplamente consolidado em estudos de toxicidade ambiental e fitotoxicidade devido à sua alta sensibilidade, rápido crescimento clonal, pequena dimensão e facilidade de cultivo. Este bioensaio é recomendado pela OECD (Test No. 221, 2006) para avaliação de toxicidade de substâncias químicas em ambientes aquáticos. Além disso, por ser uma espécie aquática de distribuição cosmopolita, os dados obtidos com *L. minor* são relevantes tanto para análises de risco ambiental quanto para triagem de compostos com potencial herbicida seletivo (Wang, 2021; Li et al., 2024).

Nesse contexto, os resultados observados com o extrato de agriãozinho indicam não apenas sua atividade fitotóxica em plantas aquáticas, mas também a possibilidade de seu uso como modelo na identificação de compostos com propriedades herbicidas naturais voltados ao manejo ecológico de espécies daninhas, com menor impacto ambiental que os herbicidas sintéticos convencionais.

## 5. CONCLUSÕES

- O extrato de *Synedrellopsis grisebachii* demonstrou potencial alelopático expressivo, com atividade fitotóxica seletiva;
- Houve inibição significativa da germinação e do crescimento de *Lactuca sativa* e *Portulaca oleracea*, associada à presença de lactonas sesquiterpênicas, fenóis e saponinas;
- Em baixas concentrações (50 ppm), observaram-se respostas horméticas, com estímulo ao crescimento radicular;
- Em *Lemna minor*, o extrato causou despigmentação e danos à maquinaria fotossintética, reforçando seu efeito fitotóxico;
- Os resultados indicam o potencial do agriãozinho como fonte de compostos herbicidas naturais e alternativa sustentável aos produtos sintéticos.

## 6. REFERÊNCIAS

ALBERTO, D.; SERRA, A. A.; SULMON, C.; GOUESBET, G.; COUÉE, I. Herbicide-related signaling in plants reveals novel insights for herbicide use strategies, environmental risk assessment and global change assessment challenges. *Science of the Total Environment*, v. 569, p. 1618-1628, 2016.

AMARAL, C. L. D.; PAVAN, G. B.; SOUZA, M. C. D.; MARTINS, J. V. F.; ALVES, P. L. D. C. A. Relações de interferência entre plantas daninhas e a cultura do grão-de-bico. *Bioscience Journal*, p. 37-46, 2015.

ATKINSON, N. J.; URWIN, P. E. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. *Journal of Experimental Botany*, v. 63, n. 10, p. 3523-3543, 2012. DOI: 10.1093/jxb/ers100.

BARROS, M. F.; MACEDO, C. S.; SCHLEDER, E. J. D.; DOURADO, D. M.; SOLON, S.; MATIAS, R. Análise fitoquímica, atividade citotóxica e antioxidante de *Synedrellopsis grisebachii* Hieron & Kuntze (Asteraceae) coletada no Pantanal e Cerrado sul-mato-grossense. *Revista Bio (In) Formação*, v. 3, p. 233-248, 2009.

BEJO, P. B. Estudo alelopático e fitoquímico do agriãozinho (*Synedrellopsis grisebachii*). Relatório Final do Programa PIBIC (CNPq) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2005.

BRASIL. Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024. Dispõe sobre a produção, a importação, a exportação, o registro, a comercialização, o uso, a inspeção, a fiscalização, a pesquisa, a experimentação, a embalagem, a rotulagem, a propaganda, o transporte, o armazenamento, as taxas, a prestação de serviços, a destinação de resíduos e embalagens e os incentivos à produção de bioinsumos para uso agrícola, pecuário, aquícola e florestal. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 dez. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15070-23-dezembro-2024-796798-publicacaooriginal-173902-pl.html>. Acesso em: 30 out. 2025.

CALABRESE, E. J. Hormesis: why it is important to toxicology and toxicologists. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 27, n. 7, p. 1451–1474, 2008.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; LÓPEZ-OVEJERO, R. Principais aspectos da resistência de plantas daninhas ao herbicida glyphosate. *Planta Daninha*, v. 21, p. 507-515, 2003.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; VICTORIA FILHO, R.; SILVA, C. B. da. Resistência de plantas daninhas aos herbicidas. *Planta Daninha*, v. 12, n. 1, p. 13-20, 1994.

CORNISH, C. M.; JOHNSON, O. F.; BANSAL, S.; MEIER, J. A.; HARRIS, T. D.; SWEETMAN, J. N. Common use herbicides increase wetland greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, v. 933, p. 17288, 2024.

DAYAN, F. E. Current status and future prospects in herbicide discovery. *Plants*, v. 8, n. 9, p. 341, 2019.

DÉLYE, C.; JASIENIUK, M.; LE CORRE, V. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*, v. 29, n. 11, p. 649-658, 2013.

DUKE, S. O.; CEDERGREEN, N.; VELINI, E. D.; BELZ, R. G. Hormesis: is it an important factor in herbicide use and allelopathy? *Outlooks on Pest Management*, v. 17, n. 1, p. 29-33, 2006.

EMBRAPA. Bioinsumos: tendência de crescimento no Brasil. Brasília: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/85620702/bioinsumos-tendencia-de-crescimento-no-brasil>. Acesso em: 30 out. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Population, food demand and agricultural production: outlook for the 21st century. Rome: FAO, 2003. Disponível em: <https://www.fao.org/4/i2307e/i2307e.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

GHORANI, V.; SAADAT, S.; KHAZDAIR, M. R.; GHOLAMNEZHAD, Z.; EL-SEEDI, H.; BOSKABADY, M. H. Phytochemical characteristics and anti-inflammatory,

immunoregulatory, and antioxidant effects of *Portulaca oleracea* L.: a comprehensive review. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, v. 2023, n. 1, p. 2075444, 2023.

GIANCOTTI, P. R. F.; ALVES, P. L. C. A.; YAMAUTI, M. S.; BARROSO, A. A. M. Controle em pós-emergência e características germinativas de aquênios de *Synedrellopsis grisebachii*. *Planta Daninha*, Viçosa-MG, v. 30, n. 2, p. 335-340, 2012. DOI: 10.1590/S0100-83582012000200012.

GIRALDELI, A. L. Manejo de *Cyperus rotundus* L. em cana-de-açúcar no sistema de mudas pré-brotadas (MPB). 2019. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-09082019->.

GNIAZDOWSKA, A.; BOGATEK, R. Allelopathic interaction between plants: multi-site action of allelochemicals. *Acta Physiologiae Plantarum*, Warszawa, v. 27, n. 3, p. 395-408, 2005. DOI: 10.1007/s11738-005-0017-3.

GOMIERO, T. Agriculture and degrowth: state of the art and assessment of organic and biotech-based agriculture from a degrowth perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 197, p. 1823-1839, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.237.

HERNÁNDEZ, L. R.; RISCALA, E. C.; CATALÁN, C. A. N.; DÍAZ, J. G.; HERZ, W. Sesquiterpene lactones and other constituents of *Stevia maimarensis* and *Synedrellopsis grisebachii*. *Phytochemistry*, v. 42, n. 3, p. 681-684, 1996.

HINZ, H. L.; WINSTON, R. L.; SCHWARZLÄNDER, M. A global review of target impact and direct nontarget effects of classical weed biological control. *Current Opinion in Insect Science*, v. 38, p. 48-54, 2020.

INDERJIT; WESTON, L. A. Are laboratory bioassays for allelopathy suitable for prediction of field responses? *Journal of Chemical Ecology*, v. 26, n. 10, p. 2111-2118, 2000. DOI: 10.1023/A:1026464816144.

INTERNATIONAL ALLELOPATHY SOCIETY (IAS). Proceedings of the First World Congress on Allelopathy: a Science for the Future. Cádiz: University of Cádiz, 1996.

IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. Plantas infestantes e nocivas. 2. ed. São Paulo: BASF Brasileira, 2000. 978 p.

KOSTINA-BEDNARZ, M.; PŁONKA, J.; BARCHANSKA, H. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 22, n. 2, p. 471-504, 2023.

LESK, C.; ROWHANI, P.; RAMANKUTTY, N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, v. 529, n. 7584, p. 84-87, 2016. DOI: 10.1038/nature16467.

MACÍAS, F. A.; MEJÍAS, F. J. R.; MOLINILLO, J. M. G. Recent advances in allelopathy for weed control: from knowledge to applications. *Pest Management Science*, v. 75, n. 9, p. 2413-2436, 2019. DOI: 10.1002/ps.5355.

MARX, C.; BARCIKOWSKI, S.; HUSTEDT, M.; HAFERKAMP, H.; RATH, T. Design and application of a weed damage model for laser-based weed control. *Biosystems Engineering*, v. 113, n. 2, p. 148-157, 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). Programa Nacional de Bioinsumos – utilização de recursos biológicos na agropecuária brasileira. Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/material-para-imprensa/pt/release-01-%20Mapa%20lanca%20Programa%20Nacional%20de%20Bioinsumos.pdf>. Acesso em: 30 out. 2025.

MOREIRA, H. J. C.; BRAGANÇA, H. B. N. Manual de Identificação de Plantas Infestantes: Hortifruti. Campinas, SP: [s.n.], 2011. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/mercadanteweb/49431779632/in/photostream/>. Acesso em: 30 out. 2025.

OERKE, E. C. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science, Cambridge*, v. 144, n. 1, p. 31-43, 2006. DOI: 10.1017/S0021859605005708.

OMEZZINE, F.; BOUAZIZ, M.; SIMMONDS, M. S. J.; HAOULA, R. Physiological and biochemical mechanisms of allelochemicals in aqueous extracts of diploid and mixoploid *Trigonella foenum-graecum* L. *South African Journal of Botany*, v. 91, p. 31-38, 2014.

PEREIRA, A. E.; GRILLO, R.; MELLO, N. F.; ROSA, A. H.; FRACETO, L. F. Application of poly (epsilon-caprolactone) nanoparticles containing atrazine herbicide as an alternative technique to control weeds and reduce damage to the environment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 268, p. 207-215, 2014.

PEREIRA, G. A. M.; MACIEL, J. C.; SANTOS, J. B.; REIS, R. F.; FERREIRA, E. A. Interferência de plantas daninhas no crescimento da cultura do trigo. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 4, n. 3, p. 23-29, 2017.



PEREIRA, V.; CANEDO, E. M.; RODRIGUES FILHO, E.; SANTOS, A. C.; GRISI, P. U.; IMATOMI, M.; GUALTIERI, S. C. Potencial fitotóxico de folhas, raízes e caules de *Serjania lethalis* A. St.-Hil. Iheringia, Série Botânica, v. 71, n. 1, p. 93-98, 2016.

PICMAN, A. K. Biological activities of sesquiterpene lactones. *Biochemical Systematics and Ecology*, v. 14, n. 3, p. 255-281, 1986.

PROCÓPIO, S. D. O.; BARIZON, R. R. M.; PAZIANOTTO, R. A. A.; MORANDI, M. A. B.; BRAZ, G. B. P. Impacts of weed resistance to glyphosate on herbicide commercialization in Brazil. *Agriculture*, v. 14, n. 12, p. 2315, 2024.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. Python: versão 3.10 [recurso eletrônico]. Python Software Foundation, 2021. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 7 jun. 2025.

RADOSEVICH, S. R.; HOLT, J. S.; GHERSA, C. M. Ecology of weeds and invasive plants: relationship to agriculture and natural resource management. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 454 p.

RICE, E. L. Allelopathy. 2nd ed. New York: Academic Press, 2012. 422 p.

SAHA, D.; MARBLE, S. C.; PEARSON, B. J. Allelopathic effects of common landscape and nursery mulch materials on weed control. *Frontiers in Plant Science*, v. 9, p. 733, 2018.

SAVARY, S.; WILLOCQUET, L.; PETHYBRIDGE, S. J.; ESKER, P.; MCROBERTS, N.; NELSON, A. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, v. 3, n. 3, p. 430-439, 2019. DOI: 10.1038/s41559-018-0793-y.

SCHEDENFFELDT, B. F.; SANTOS, P. H. V. D.; HIRATA, A. C. S.; SOARES, M. R.; MONQUERO, P. A. Influence of the density and distance of *Digitaria horizontalis* Willd in the biometric and nutritional parameters of pre-sprouted seedlings of sugarcane. *Revista Caatinga*, v. 35, p. 528-536, 2022.

SCAVO, A.; MAUROMICALE, G. Crop allelopathy for sustainable weed management in agroecosystems: knowing the present with a view to the future. *Agronomy*, v. 11, n. 11, p. 2104, 2021.

SCHEFFER-BASSO, S. M.; FIORENTIN, F. J. R.; FAVARETTO, A. Influence of phenology and post-harvest processing of vegetal material on the allelopathy of annoni grass (*Eragrostis plana*) extracts. *Planta Daninha*, v. 37, p. e019175663, 2019.

SEAMAN, F. C. Sesquiterpene lactones as taxonomic characters in the Asteraceae. *Botanical Review*, v. 48, p. 121–595, 1982.

SHANER, D. L.; BECKIE, H. J. The future for weed control and technology. *Pest Management Science*, v. 70, n. 9, p. 1329-1339, 2014.

SILVA, B. P. da. Potencial alelopático de *Cosmos sulphureus* Cav. 2017. 138 f. Dissertação (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 2017.

SINDEN, J.; JONES, R.; HESTER, S.; ODOM, D.; KALISCH, C.; JAMES, R.; CACHO, O.; GRIFFITH, G. The economic impact of weeds in Australia. *Technical Series*, n. 8, 2004.

SOUZA, F. P.; CASTILHO, T. P.; MACEDO, L. O. Um marco institucional para os bioinsumos na agricultura brasileira. *Sustainability in Debate*, v. 13, n. 1, p. 266-285, 2022. DOI: 10.18472/SustDeb.v13n1.2022.40820.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 108, n. 50, p. 20260-20264, 2011. DOI: 10.1073/pnas.1116437108.

UNITED NATIONS. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/content/world-population-prospects-2022>. Acesso em: 30 out. 2025.

VARANASI, A.; PRASAD, P. V. V.; JUGULAM, M. Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy. *Advances in Agronomy*, v. 135, p. 107-146, 2016.

WEIR, T. L.; PARK, S.-W.; VIVANCO, J. M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 7, n. 4, p. 472-479, 2004. DOI: 10.1016/j.pbi.2004.05.007.

WILLER, H.; TRÁVNÍČEK, J.; SCHLATTER, B. (Eds.). *The World of Organic Agriculture – Statistics and Emerging Trends 2023*. Frick: FiBL; Bonn: IFOAM – Organics International, 2023. ISBN 978-3-03736-456-7.

ZHAO, Y.; MOHI UD DIN, A.; ALI RAZA, M.; YANG, W.; YU, J.; DENG, X. W.; FENG, L. The usage of imidazolinone-tolerant maize in maize–soybean strip intercropping greatly facilitates weed control. *Frontiers in Agronomy*, v. 7, p. 1498417, 2025.

ZISKA, L. H. Climate change and the herbicide paradigm: visiting the future. *Agronomy*, v. 10, n. 12, p. 1953, 2020.