UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
***CAMPUS* CERRO LARGO**
CURSO DE AGRONOMIA

LUIZ FELIPE DAL MASO

AVALIAÇÃO DO EFEITO ALELOPÁTICO DA CARINATA EM SEMENTES DE SOJA E MILHO

CERRO LARGO
2025

LUIZ FELIPE DAL MASO

AVALIAÇÃO DO EFEITO ALELOPÁTICO DA CARINATA EM SEMENTES DE SOJA E MILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do grau de bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons

CERRO LARGO

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

, Luiz Felipe Dal Maso
AVALIAÇÃO DO EFEITO ALELOPÁTICO DA CARINATA EM SEMENTES DE SOJA E MILHO / Luiz Felipe Dal Maso . -- 2025.
42 f.:il.

Orientador: Doutor Sidinei Zwick Radons

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo,RS, 2025.

1. Alelopatia. 2. Carinata. I. Radons, Sidinei Zwick, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LUIZ FELIPE DAL MASO

AVALIAÇÃO DO EFEITO ALELOPÁTICO DA CARINATA EM SEMENTES DE SOJA E MILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 02/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sidinei Zwick Radons– UFFS
Orientador

Prof. Dr. Nerison Luis Poersch - UFFS
Avaliador

Prof.ª Dr.ª Lana Bruna de Oliveira Engers – UFFS
Avaliador

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me acompanharam nessa jornada e sempre me incentivaram a me tornar quem estou me tornando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais, que me incentivaram dia após dia para conseguir chegar até aqui. Agradeço também aos amigos que fiz durante essa jornada acadêmica.

Também agradeço aos professores que fizeram parte desta trajetória, em especial meu orientador, Sidinei Radons, que sempre demonstrou interesse em me auxiliar durante toda a elaboração deste trabalho. Meu muito obrigado pelo profissionalismo, pela paciência e por todo o conhecimento transmitido.

Olhando para trás, percebo que esta jornada foi menos sobre a formação de um profissional e mais sobre a construção do indivíduo que me tornei hoje.

Meus sinceros agradecimentos a todos que fizeram parte disso. Muito obrigado.

"Você não pode conectar os pontos olhando para frente; você só pode conectá-los olhando para trás. Então você tem que confiar que os pontos de alguma forma se conectarão no seu futuro. Você tem que confiar em algo — sua intuição, destino, vida, karma, o que for. Essa abordagem nunca me decepcionou e fez toda a diferença na minha vida." — Steve Jobs

RESUMO

A diversificação dos sistemas de cultivo de inverno no Sul do Brasil tem levado à busca por culturas alternativas, como a *Brassica carinata*, que se destaca pelo seu potencial para a produção de biocombustíveis e rusticidade. Contudo, sendo uma *Brassicácea*, a *B. carinata* pode liberar compostos alelopáticos que afetam o desenvolvimento de culturas sucessoras. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito alelopático do extrato aquoso da parte aérea de *B. carinata* sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de sementes de soja (*Glycine max*) e milho (*Zea mays*). O experimento foi conduzido em laboratório, utilizando um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2x6, com duas culturas (soja e milho) e seis concentrações do extrato (0%; 1%; 2,5%; 5%; 7,5% e 10%), com quatro repetições. Foram avaliados a porcentagem de germinação, o índice de velocidade de germinação (IVG) e o comprimento de plântulas. Os resultados indicaram um efeito alelopático seletivo. Para a cultura do milho, o extrato de *B. carinata* não apresentou efeito significativo ($p>0,05$) em nenhuma das variáveis analisadas, sugerindo tolerância da monocotiledônea aos compostos presentes. Em contrapartida, na soja, o extrato reduziu significativamente o IVG ($p<0,05$), indicando uma diminuição no vigor germinativo com o aumento da concentração. O comprimento do hipocótilo da soja respondeu de forma quadrática, com um efeito hormético, sendo estimulado na concentração de 2,5% e inibido em concentrações superiores. Conclui-se que a *B. carinata* possui potencial alelopático que afeta negativamente o desenvolvimento inicial da soja, mas não do milho, em condições de laboratório. Recomenda-se um manejo criterioso dos restos culturais da carinata em sistemas de sucessão com a soja.

Palavras-chave: Alelopatia, *Brassica carinata, Glycine max, Zea mays*, Rotação de culturas, Germinação.

ABSTRACT

The diversification of winter cropping systems in Southern Brazil has led to the search for alternative crops, such as *Brassica carinata*, which stands out for its potential for biofuel production and its hardiness. However, as a member of the Brassicaceae family, B. carinata can release allelopathic compounds that affect the development of subsequent crops. Therefore, this study aimed to evaluate the allelopathic effect of an aqueous extract from the aerial parts of B. carinata on the germination and initial development of soybean (*Glycine max*) and corn (*Zea mays*) seeds. The experiment was conducted in a laboratory using a completely randomized design in a 2x6 factorial scheme, with two crops (soybean and corn) and six extract concentrations (0%; 1%; 2.5%; 5%; 7.5%; and 10%), with four replications. Germination percentage, germination speed index (GSI), and seedling length were evaluated. The results indicated a selective allelopathic effect. For corn, the B. carinata extract showed no significant effect ($p>0.05$) on any of the analyzed variables, suggesting tolerance of the monocotyledonous species to the compounds present. In contrast, for soybean, the extract significantly reduced the GSI ($p<0.05$), indicating a decrease in germination vigor as the concentration increased. The soybean hypocotyl length showed a quadratic response with a hormetic effect, being stimulated at the 2.5% concentration and inhibited at higher concentrations. It is concluded that B. carinata has an allelopathic potential that negatively affects the initial development of soybean but not of corn under laboratory conditions. Careful management of carinata crop residues is recommended in succession systems with soybean.

Keywords: Allelopathy, *Brassica carinata, Glycine max, Zea mays*, Crop rotation, Germination.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 REVISÃO DE LITERATURA 12
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA AGRICULTURA DE INVERNO NO BRASIL E NA REGIÃO SUL 12
2.2 POTENCIAL AGRONÔMICO E INDUSTRIAL DA *BRASSICA CARINATA* 14
2.3 SOJA 16
2.4 MILHO 21
2.5 ALELOPATIA 22
3 MATERIAL E MÉTODOS 26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 29
5. CONCLUSÕES 35
REFERÊNCIAS 36

1 INTRODUÇÃO

A busca por culturas de inverno alternativas tem sido impulsionada pela saturação de sistemas produtivos tradicionais, onde trigo, canola e aveia dominam não apenas o espaço físico, mas também os recursos edáficos, limitando a diversificação necessária para mitigar pragas, doenças e a exaustão do solo. Nesse contexto, a *Brassica carinata* destaca-se como uma candidata promissora, ainda que subexplorada, capaz de ocupar nichos marginais com exigências agronômicas reduzidas.

Originária do planalto etíope, essa brássica alotetraploide é resultado do cruzamento natural entre *Brassica nigra* e *Brassica oleracea*, combinando a rusticidade de suas progenitoras com características únicas, como tolerância a solos pobres e déficit hídrico. Enquanto Canadá e Argentina lideram sua produção global, vinculada a políticas de biocombustíveis avançados e contratos com empresas como a Nuseed (Nuseed, [s.d]). No Brasil, sua adoção ainda se restringe a projetos-piloto, esbarrando em lacunas críticas de manejo fitotécnico, especialmente em regiões como as Missões, caracterizada por solos ácidos (Latossolos Vermelhos) e regime pluviométrico irregular, com veranicos frequentes no inverno. Um trabalho feito por Ciciliano *et al*., (2023) mostrou que a carinata apresenta potencial promissor para diversificação de culturas no Brasil.

De acordo com Ciciliano *et al*., (2023), pesquisas recentes confirmam o alto teor de óleo da carinata, destacando seu potencial para a produção de biocombustíveis. Com teor de óleo que chega a 48% nas sementes, superior ao da canola e da soja, a carinata posiciona-se como matéria-prima estratégica para bioquerosene de aviação, mercado em expansão devido às metas globais de descarbonização. Além disso, sua torta residual, com até 42% de proteína bruta, é aprovada para alimentação animal em países como EUA e Canadá, embora exija processamento para reduzir glucosinolatos, compostos sulfurados que, em excesso, podem causar distúrbios metabólicos em ruminantes. Contudo, são justamente esses glucosinolatos que conferem à família Brassicaceae um elevado potencial alelopático. Quando liberados no solo, esses compostos se decompõem em substâncias bioativas, como os isotiocianatos, capazes de influenciar o desenvolvimento de outras plantas no sistema de rotação.

A influência das culturas de cobertura no agroecossistema transcende os efeitos físicos, envolvendo interações bioquímicas complexas, um fenômeno conhecido como alelopatia. Essa interação ocorre pela liberação de compostos químicos que podem suprimir o desenvolvimento de outras plantas, incluindo espécies daninhas (Monquero; Christoffoleti, 2005). A suscetibilidade da soja e do milho a esses aleloquímicos é bem documentada, com extratos de diferentes espécies de cobertura demonstrando potencial para inibir a germinação e o crescimento inicial de ambas as culturas (Pereira; Lara; Ferreira, 2009). O potencial alelopático é especialmente notório na família Brassicaceae, à qual a carinata pertence. Em um estudo com *Camelina sativa*, outra brassica, Gusman, Bittencourt e Vestena (2011) observaram um efeito inibitório significativo no desenvolvimento radicular da soja, evidenciando o risco que os aleloquímicos liberados por esta família botânica podem representar para a cultura sucessora.

Apesar do conhecido potencial alelopático da família Brassicaceae e da crescente adoção da carinata em sistemas de produção, o efeito específico de seus resíduos culturais sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de culturas de grande importância econômica que a sucedem, como a soja e o milho, permanece pouco explorado cientificamente. Compreender essa interação é fundamental para evitar possíveis perdas de produtividade e para desenvolver recomendações de manejo que maximizem os benefícios da diversificação sem comprometer a rentabilidade da lavoura principal.

Diante do disso, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito alelopático da *Brassica carinata* na germinação e no desenvolvimento inicial da soja e do milho em condições de laboratório.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA AGRICULTURA DE INVERNO NO BRASIL E NA REGIÃO SUL

A agricultura de inverno desempenha um papel importante nos sistemas produtivos brasileiros, especialmente na região sul, onde o clima subtropical favorece o cultivo de diversas espécies durante os meses mais frios. Comumente, culturas como trigo, aveia e canola são cultivadas nesse período, pois atuam diversificando os meios de cultivo e gerando palhada para proteger o solo para as culturas de verão.

Dentre as culturas mais consolidadas na região, o trigo (*Triticum aestivum*) ocupa a primeira posição, pois é uma cultura que está a mais tempo no estado. Segundo dados da série histórica da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), ano de 1977, no Rio Grande do Sul, foram semeados cerca de 1.500.000 hectares, já no ano de 2024, esse número decaiu para 1.390.000 hectares, podendo ser um reflexo das oscilações de mercado, instabilidades climáticas e elevados custos de produção (CONAB, 2024).

Outra cultura de inverno muito presente na região sul do Brasil é a aveia, onde além da produção de grãos, também é utilizada para pastagens ou cobertura de solo em sistemas de plantio direto (CBPA, 2006). Essa versatilidade se deve à elevada produção de biomassa, à rápida cobertura do solo e à capacidade de reciclar nutrientes, especialmente o nitrogênio, favorecendo o desempenho das culturas subsequentes. Em sistemas de rotação, a aveia tem se mostrado eficiente na supressão de plantas daninhas e na melhoria das condições físicas do solo, contribuindo para a manutenção da estrutura e da umidade, além de reduzir o impacto da erosão (Queiroga; Gomes, 2002). Em 1976, a área total de aveia cultivada no Rio grande do Sul era de 29,5 mil hectares. Em 2024 esse valor aumentou para 356 mil hectares semeadas (CONAB, 2024). Esses dados da série histórica mostram que a cultura teve uma boa adaptabilidade na região. No entanto, devido ao seu baixo valor de mercado, a aveia muitas vezes deixa de ser atrativa para o produtor, o que abre espaço para a inserção de outras culturas de inverno com maior retorno econômico.

Segundo Estévez (2014), a canola (*Brassica napus* var*. oleifera*) tem se destacado nos últimos anos, especialmente na região sul do Brasil, pois promete ser uma cultura promissora. Seu uso é dividido, podendo ser utilizada como planta de

cobertura para as espécies subsequentes, como a soja, ou também em produção em larga escala para a extração do seu óleo, que pode ser utilizado na cozinha. O plantio dessa cultura também reduz a ocorrência de doenças, beneficiando as culturas subsequentes e promovendo melhorias na qualidade do solo (Passos; Alvarenga; Santos, 2020).

Um estudo realizado por Colet *et al.*, 2020, em Santa Maria, avaliou o desempenho de híbridos de canola cultivados em locais de baixa altitude, onde os híbridos demonstraram variações morfológicas e na produção de grãos. As médias de produção ficaram maior do que as estimadas para aquela região, provando que a canola apresenta um bom desenvolvimento na depressão central do Rio Grande do Sul. Com isso, concluiu-se que a canola pode ser viabilizada no estado, desde que o manejo seja feito de forma correta.

Segundo dados da CONAB, os primeiros registros de semeadura dessa cultura, no Rio Grande do Sul, se dão em 2009, com um total de 23 mil hectares semeadas naquele ano, e uma produção de 32,2 mil toneladas. Já no último ano, essa área aumentou para 146,1 mil hectares semeados, um salto de 535%, tendo uma produção total de 193 mil toneladas. Para o ano de 2025, é estimado que sejam semeados cerca de 200 mil hectares, produzindo um total de 292 mil toneladas.

Esse salto na área semeada com canola não é casual: reflete a urgência por diversificação e pela busca de culturas mais resilientes às condições de solo e clima da região sul. No entanto, apesar do crescimento expressivo, a canola ainda enfrenta limitações, principalmente quanto à sensibilidade a solos ácidos e ao déficit hídrico, situações recorrentes em áreas como a região das missões.

É nesse momento que a carinata (*Brassica carinata*) começa a ganhar espaço. Com origem no planalto etíope e rusticidade genética herdada de suas espécies parentais (*Brassica nigra* X *B. oleracea*), a carinata se mostra mais tolerante a solos de baixa fertilidade e veranicos típicos do inverno gaúcho. Além disso, o potencial produtivo de óleo de suas sementes, podendo atingir até 48%, supera o da própria canola e da soja, colocando-a como forte candidata para a produção de bioquerosene de aviação, um setor que cresce à medida que a agenda global de descarbonização avança (Ciciliano *et al*., 2023).

2.2 POTENCIAL AGRONÔMICO E INDUSTRIAL DA *BRASSICA CARINATA*

As consequências ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis não renováveis têm precipitado a busca global por alternativas sustentáveis de fontes renováveis. Nesse contexto, a carinata emerge como uma plataforma biomolecular de oleaginosa não alimentícia e de baixa intensidade de carbono, desenvolvida para a produção de biocombustíveis avançados, farelos proteicos e coprodutos de valor agregado. Essa cultura demonstra ampla adaptabilidade a zonas climáticas úmidas subtropicais e continentais, distribuídas pela Ásia, África, Américas, Europa e Austrália, podendo ser cultivada tanto em ciclos de primavera quanto de inverno. Destacam-se, ainda, sua termotolerância, resistência a patógenos, menor susceptibilidade à deiscência de vagens e demanda hídrica reduzida em comparação a outras espécies oleaginosas do gênero *Brassica* (Seepaul *et al.*, 2021).

A *Brassica carinata* tem algumas vantagens em relação a outras oleaginosas, como a soja e a canola. Ela usa menos água, o que é ótimo para lugares mais secos ou com pouca irrigação. Também é mais resistente a doenças, então não é preciso aplicar quantidades grandes de pesticidas e tem menos risco de perder a safra para fungos ou bactérias. Fora isso, ela é menos propensa a perder sementes antes da colheita, o que ajuda no rendimento. Ademais, se adapta bem a diferentes tipos de solo e clima, então pode ser cultivada em várias regiões. Com isso, ela aparece como uma boa opção para produzir biocombustíveis de forma mais econômica e sustentável (Kumar *et al.*, 2020).

Um estudo realizado nos Estados Unidos objetivou analisar o comportamento de 11 cultivares de carinata sob as condições de inverno no sudeste do país durante o período de 2015 a 2017. Foram analisados componentes de rendimento como rendimento de sementes e teor de óleo. O ciclo total das 11 cultivares variou entre 154 a 165 dias, e as médias de produtividade foram de 3100 kg/ha, o que superou estudos anteriores (Kumar *et al.*, 2020).

Ainda de acordo com os estudos de Kumar *et al*., (2020), a carinata demonstrou ser altamente adaptável ao clima semiárido e pode ser cultivada em condições mais adversas, contribuindo para a diversificação das fontes de cultivo em áreas de baixo custo agrícola. A pesquisa também mostrou que a carinata pode ser uma excelente opção para a rotação de culturas, sendo cultivada após outras culturas de ciclo mais longo, como o milho, para aproveitar o espaço agrícola e melhorar o uso do solo.

Bhattarai *et al*., (2020), investigou-se a influência da adubação nitrogenada e sulfúrica no desempenho agronômico de carinata sob condições de clima temperado na Dakota do Sul (EUA). Os resultados evidenciaram que o rendimento de sementes e a composição lipídica foram modulados por interações sinérgicas entre os nutrientes, atingindo picos de eficiência com doses de 112 kg/ha de nitrogênio e 45 kg/ha de enxofre. A pesquisa demonstrou a relevância crítica do equilíbrio estequiométrico na relação nitrogênio:enxofre (4:1), não apenas para maximizar a produtividade, mas também para mitigar distúrbios morfofisiológicos, como o acamamento exacerbado associado à desproporção nutricional.

Além das exigências nutricionais, a viabilidade da *Brassica carinata* para a indústria de biocombustíveis, especificamente para o bioquerosene de aviação, está intrinsecamente ligada ao perfil de ácidos graxos de suas sementes. A cultura apresenta um alto teor de ácido erúcico, frequentemente superior a 40%, característica que, embora a torne imprópria para o consumo humano e animal direto, confere propriedades físico-químicas ideais para processos de hidrotratamento e produção de combustíveis do tipo drop-in. Essa especificidade química valoriza a carinata no mercado energético, evitando a competição direta com commodities alimentares (Zanetti et al., 2013).

Outro aspecto relevante para a sustentabilidade do cultivo é o papel da carinata como cultura de cobertura de inverno (*winter cover crop*). A inserção dessa espécie em sistemas de plantio direto não apenas gera renda ao produtor na entressafra, mas também promove serviços ecossistêmicos cruciais, como a redução da erosão do solo e o sequestro de carbono atmosférico. Essa capacidade de reter carbono no solo é um dos principais fatores que qualificam o combustível derivado da carinata como de baixa intensidade de carbono, atendendo a rígidas certificações ambientais internacionais (Iboyi et al., 2021).

A resistência à deiscência das síliquas (vagens) é um dos principais diferenciais agronômicos da *Brassica carinata* quando comparada a outras brássicas, como a canola (Brassica napus). Enquanto a canola apresenta alta propensão à abertura espontânea das vagens na maturidade fisiológica, o que frequentemente exige o corte prévio (*swathing*) para evitar perdas de grãos, a carinata mantém suas síliquas fechadas por mais tempo devido à sua constituição genética robusta. Essa característica de indeiscência permite a realização da colheita mecânica direta com a cultura em pé, simplificando a logística operacional e reduzindo drasticamente as

perdas de produtividade causadas por ventos fortes ou atrasos na colheita (Gesch et al., 2019).

2.3 SOJA

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*) estabeleceu-se ao longo do século XX e início do século XXI como uma das mais estratégicas commodities agrícolas em escala global, desempenhando um papel fundamental para a segurança alimentar e a matriz energética mundial (Bruneli, 2025; Campeão; Sanches; Maciel, 2020). Sua trajetória, de uma cultura regional asiática a um pilar do agronegócio internacional, é marcada por uma expansão que hoje ocupa mais de 130 milhões de hectares em todo o mundo, abastecendo cadeias produtivas que se estendem da alimentação humana e animal à produção de biocombustíveis e insumos para a indústria química (Bruneli, 2025).

No cenário nacional, a soja transcende a sua importância como mero produto agrícola para se posicionar como a principal cultura da agricultura brasileira, sendo o carro-chefe do agronegócio e um dos principais motores da economia do país (Dall'agnol, 2011; EMBRAPA, 2025). Ocupando 59% das áreas destinadas ao cultivo de grãos no Brasil, a oleaginosa é responsável por uma parcela substancial do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e lidera a pauta de exportações, garantindo um fluxo vital de divisas para a balança comercial (EMBRAPA, [S.D.]; Freitas; Mendonça, 2016).

A importância da soja na China antiga era tão proeminente que o grão era considerado sagrado, ao lado do arroz, trigo, cevada e milheto, evidenciando seu papel central na agricultura e na dieta da civilização (EMBRAPA, [S.D.]). O consumo milenar na Ásia, contudo, difere significativamente do padrão ocidental. Nos países orientais, a soja é predominantemente consumida na forma de derivados fermentados, como complemento a uma dieta rica em peixes e vegetais, e não como um substituto direto para proteínas animais (Gazzoni, 2018).

Após sua domesticação, a soja expandiu-se para outras regiões da Ásia, chegando à Coreia e ao Japão, onde se integrou profundamente às culturas alimentares locais, tornando-se base para produtos como missô, tofu e shoyu (BRUNELI, 2025). No entanto, sua disseminação para o mundo ocidental foi um fenômeno consideravelmente tardio. A leguminosa foi introduzida na Europa apenas

em 1712, inicialmente como uma curiosidade botânica cultivada em jardins para fins ornamentais e científicos (Gazzoni, 2018).

Nos Estados Unidos, os primeiros relatos de cultivo datam de 1765, mas a cultura permaneceu marginal por mais de um século (Gazzoni, 2018). A ascensão da soja como uma commodity global não foi impulsionada por uma difusão alimentar gradual, mas sim por demandas industriais e geopolíticas específicas do século XX. A escassez de óleos vegetais durante a Primeira Guerra Mundial e a crescente demanda por fontes de proteína para ração animal durante a Segunda Guerra Mundial catalisaram sua expansão comercial nos EUA, que rapidamente se tornaram líderes mundiais de produção (Bruneli, 2025). Este descompasso entre uma domesticação milenar e uma globalização recente e acelerada demonstra como a utilidade de um recurso agrícola pode ser radicalmente redefinida por novos contextos tecnológicos, econômicos e conflitos globais, transformando a soja de um grão de subsistência regional em um insumo industrial estratégico.

A história da soja no Brasil iniciou-se em 1882, quando o agrônomo Gustavo D'Utra introduziu as primeiras sementes oriundas dos Estados Unidos no estado da Bahia. O objetivo, contudo, resultou em fracasso, pois o material genético, desenvolvido para climas temperados, não se adaptou às condições de baixa latitude e ao calor da região (Gazzoni, 2018; Dall’agnol, 2011). Tentativas subsequentes em São Paulo, em 1891, obtiveram sucesso relativo, mas foi no Rio Grande do Sul, a partir de 1900, que a cultura encontrou condições climáticas similares às de sua região de origem nos EUA, permitindo seu estabelecimento (Dall’agnol, 2011).

Apesar do êxito agronômico, a soja permaneceu como uma cultura de pouca expressão econômica por cerca de 70 anos (1882-1950) (Dall’agnol, 2011). Seguindo um padrão semelhante ao observado nos Estados Unidos, seu cultivo inicial era voltado principalmente para a produção de forragem para bovinos e, em menor escala, como grão para o engorde de suínos em pequenas propriedades rurais gaúchas (Dall’agnol, 2011). A primeira referência de produção comercial data apenas de 1941, com modestas 450 toneladas colhidas em 640 hectares (Dall’agnol, 2011).

A década de 1960 marcou o ponto de inflexão para a sojicultura no Brasil. Dois fatores internos foram determinantes para essa mudança: a necessidade de uma cultura de verão para ser semeada em sucessão ao trigo, principal cultura de inverno na Região Sul, e a crescente demanda por farelo de soja para alimentar um rebanho de aves e suínos em franca expansão (EMBRAPA, [S.D.]; Dall’agnol, 2011). Em 1966,

a produção já alcançava 500 mil toneladas, sinalizando sua viabilidade como um produto comercial estratégico (EMBRAPA, [S.D.]).

O verdadeiro aumento ocorreu na década de 1970. A combinação da explosão dos preços da soja no mercado internacional, a ampliação da indústria nacional de óleo e uma vantagem competitiva única — o escoamento da safra brasileira durante a entressafra norte-americana, período de maiores cotações — consolidou a oleaginosa como a cultura líder do agronegócio brasileiro (Dall'agnol, 2011; EMBRAPA, [S.D.]). Essa demanda aquecida impulsionou a expansão das lavouras para além das fronteiras do Sul, iniciando a ocupação de novas áreas no Centro-Oeste (Freitas; Mendonça, 2016).

A proeminência da soja no cenário global é sustentada por uma cadeia produtiva complexa e por sua notável versatilidade. A cadeia de valor se inicia com o fornecimento de insumos, como sementes, fertilizantes e agroquímicos, passa pela produção agrícola e segue para as etapas de armazenagem, processamento e distribuição (Campeão; Sanches; Maciel, 2020). O grão, composto por aproximadamente 40% de proteína e 20% de óleo, é a matéria-prima para uma vasta gama de produtos (Dall'agnol, 2011; Vieira Filho; Conceição, 2024).

Seu principal uso é como fonte de proteína de alta qualidade na formulação de ração para a criação de aves e suínos, sustentando a cadeia de carnes em escala mundial. Na alimentação humana, é transformado em óleo de cozinha, margarinas, leites vegetais e proteínas texturizadas. Além disso, seus derivados são empregados na indústria farmacêutica, de cosméticos e, cada vez mais, na produção de biocombustíveis, como o biodiesel, o que a torna um insumo estratégico para a segurança alimentar e energética (Campeão; Sanches; Maciel, 2020; Dall'agnol, 2011).

O Brasil consolidou sua posição como um dos mais importantes players do mercado mundial de soja, disputando com os Estados Unidos a liderança na produção e, desde 2012, firmando-se como o maior exportador global do grão (Campeão; Sanches; Maciel, 2020). A competitividade brasileira é resultado de uma combinação de fatores, incluindo custos de produção favoráveis, políticas de câmbio e, principalmente, a capacidade única de expandir a produção em larga escala para atender à crescente demanda (Campeão; Sanches; Maciel, 2020).

Análises de competitividade no período de 2002 a 2017 mostram que o "efeito competitividade" do Brasil foi consistentemente positivo, enquanto o de seus principais

concorrentes, EUA e Argentina, foi negativo. Esse desempenho se deveu, em grande parte, ao aumento da participação brasileira nas importações da China, que saltou de 29% para 44% no período (Campeão; Sanches; Maciel, 2020). Atualmente, o mercado chinês é o principal destino da soja brasileira, absorvendo cerca de 73% do total exportado pelo país e atuando como o principal vetor de crescimento da produção nacional (Campeão; Sanches; Maciel, 2020; EMBRAPA, 2025).

A sojicultura é um dos principais motores da economia brasileira, com um impacto que se estende muito além das porteiras das fazendas. A cultura é frequentemente classificada como um novo ciclo de desenvolvimento agrícola, com importância histórica comparável aos ciclos do café e da cana-de-açúcar, devido aos seus profundos encadeamentos com setores urbanos e industriais (Neto; Rai, 2024).

Como principal produto da pauta de exportação do Brasil, a soja é responsável por gerar um volume expressivo de divisas, sendo fundamental para o superávit da balança comercial e para a estabilidade macroeconômica do país (Dall'agnol, 2011; Campeão; Sanches; Maciel, 2020). O complexo da soja, incluindo grão, farelo e óleo, alavanca o Produto Interno Bruto (PIB) nacional, não apenas pelo valor gerado na produção primária, mas também por estimular uma vasta cadeia de serviços e indústrias associadas (Dall'agnol, 2011; EMBRAPA, 2025).

A expansão da sojicultura no Brasil ilustra um paradoxo central nos estudos sobre desenvolvimento: O crescimento econômico robusto não se traduz, necessariamente, em uma melhoria proporcional e generalizada do bem-estar social. Estudos que avaliaram o impacto da cultura em nível municipal, entre os anos de 1991 e 2010, revelam uma dissociação crítica entre indicadores de riqueza e de desenvolvimento humano (Neto; Rai, 2024).

A análise demonstra que ser um município produtor de soja tende a intensificar positivamente o PIB per capita, confirmando o papel da cultura como vetor de crescimento econômico local (Neto; Rai, 2024). Contudo, o mesmo estudo não encontrou impacto significativo da produção de soja no Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) em sua dimensão global. Ao desagregar os componentes do índice, os resultados são ainda mais reveladores: observa-se um efeito positivo na dimensão "conhecimento/educação", mas um impacto negativo na dimensão "longevidade" (Neto; Rai, 2024). A literatura científica levanta a hipótese de que essa redução na expectativa de vida pode estar associada ao uso intensivo de agrotóxicos nas lavouras, afetando a saúde de trabalhadores rurais e de moradores de localidades

próximas (Neto; Rai, 2024; Silva et al., 2020). Essa evidência sugere que a narrativa de sucesso econômico da soja é incompleta, pois os benefícios monetários coexistem com custos sociais, notadamente na saúde pública, que precisam ser considerados em uma avaliação integral de seu impacto.

O século XXI testemunhou um crescimento exponencial da sojicultura no Brasil, consolidando o país como uma superpotência agrícola. A produção saltou de 38,4 milhões de toneladas na safra 2000/2001 para um patamar recorde de 154,6 milhões de toneladas na safra 2022/2023, um aumento superior a 300% em pouco mais de duas décadas (Vieira Filho; Conceição, 2024). Esse avanço foi sustentado tanto pela expansão da área cultivada, que passou de 10,65 milhões de hectares em 1993 para 44,45 milhões em 2023, quanto por ganhos contínuos de produtividade, impulsionados pela adoção de tecnologia de ponta (Gazzoni, 2018).

De acordo com o 10º levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a estimativa para a safra de soja 2024/25 aponta para uma produção recorde de 169,5 milhões de toneladas. Este volume será colhido em uma área de 47,61 milhões de hectares, com uma produtividade média nacional projetada em 3.560 kg/ha (EMBRAPA, 2025).

A produção nacional continua concentrada, com o estado de Mato Grosso se destacando como o maior produtor, responsável por quase um terço do volume total do país. A seguir, vêm os estados do Paraná e Goiás, que também apresentam números expressivos. Notavelmente, Goiás registra a maior produtividade média entre os grandes produtores, alcançando 4.122 kg/ha, o que evidencia a alta tecnificação da agricultura na região (EMBRAPA, 2025).

O balanço de oferta e demanda da soja brasileira reflete sua forte orientação para o mercado externo. Para o ano de 2026, estima-se que das mais de 154 milhões de toneladas de soja em grão disponíveis, 98,8 milhões de toneladas serão exportadas, enquanto 55,8 milhões de toneladas serão destinadas ao consumo interno, principalmente para esmagamento e produção de farelo e óleo (EMBRAPA, 2025). O farelo de soja também tem um volume de exportação significativo, chegando a 23,1 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2025).

As projeções da CONAB para o futuro próximo indicam a continuidade dessa tendência de crescimento. Para a safra 2025/26, a expectativa é de novos recordes, com a área cultivada podendo atingir 49,08 milhões de hectares e a produção se aproximando de 177,7 milhões de toneladas. Esse avanço é impulsionado pela

previsão de uma demanda global aquecida, com destaque para a China, e por um cenário comercial favorável ao produto brasileiro (EMBRAPA, 2025).

2.4 MILHO

O milho (*Zea mays L.*) é uma das principais commodities agrícolas globais, ocupando posição de destaque na produção de grãos e na economia mundial. Em 2024, a produção mundial de milho foi estimada em aproximadamente 1,2 bilhão de toneladas, com os Estados Unidos, China e Brasil entre os maiores produtores (USDA, 2024). No Brasil, o milho é fundamental para a alimentação humana e animal, sendo responsável por cerca de 70% da composição das rações produzidas nacionalmente, além de ser matéria-prima para a indústria de etanol, ampliando sua relevância econômica e estratégica (EMBRAPA, 2023; USDA, 2024).

No Sul do Brasil, o milho é cultivado principalmente como cultura de verão, integrando sistemas de rotação com soja, trigo e outras culturas. Essa prática contribui para a sustentabilidade do sistema produtivo, melhorando a estrutura do solo e reduzindo a incidência de pragas e doenças. A região enfrenta desafios como variações climáticas, períodos de estiagem, pressão de pragas (como lagarta-do-cartucho e cigarrinha-do-milho) e doenças fúngicas, exigindo manejo integrado e tecnologias adaptadas para garantir produtividade e rentabilidade (EMBRAPA, 2023)

A safra 2023 representou um novo recorde para a cultura do milho no Brasil. De acordo com a Pesquisa Agrícola Municipal (PAM) do IBGE, a produção total atingiu 132,0 milhões de toneladas, um crescimento de 20,2% em relação ao ano anterior. Esse volume foi colhido em uma área de 22,3 milhões de hectares, 5,9% maior que a da safra passada, resultando em um rendimento médio de 5.919 kg/ha, 13,5% superior. O resultado expressivo foi impulsionado por condições climáticas favoráveis na maior parte do ciclo da segunda safra, que permitiram uma recuperação da produtividade (CONAB, 2025).

As projeções da Conab para as safras futuras, indicam a manutenção de uma produção robusta, com estimativas que variam entre 124,7 e 137 milhões de toneladas, sinalizando que o Brasil continuará a ser um fornecedor chave de milho para o mercado global.

Fisiologicamente, o milho é uma monocotiledônea, apresentando germinação caracterizada pelo rápido desenvolvimento do sistema radicular e das folhas

embrionárias. Essa característica influencia sua resposta a estresses ambientais e químicos, incluindo compostos alelopáticos. Estudos mostram que o milho pode ser sensível a extratos vegetais de outras espécies, com efeitos que variam conforme a concentração e o tipo de composto, podendo ocorrer tanto estimulação quanto inibição do crescimento (Belz et al., 2007) Essa sensibilidade é relevante para o manejo de culturas de cobertura e rotação, pois pode impactar o estabelecimento inicial e a competitividade da cultura no campo. Contudo, a tolerância a compostos específicos, como os glucosinolatos presentes nas brássicas, é uma área que ainda demanda investigação, visto que gramíneas podem apresentar respostas distintas das dicotiledôneas.

A mais recente e transformadora aplicação do milho no Brasil é sua conversão em etanol. A produção de biocombustível a partir do cereal experimentou um crescimento vertiginoso na última década, especialmente na região Centro-Oeste. Este fenômeno é explicado pela combinação de uma vasta oferta de milho de segunda safra com altos custos logísticos para escoar o grão para os portos de exportação. A industrialização local do milho para produzir etanol tornou-se uma alternativa economicamente atrativa, agregando valor na origem e criando uma nova e robusta demanda para o cereal (EMBRAPA, 2025).

2.5 ALELOPATIA

A alelopatia é um fenômeno biológico definido como a capacidade que certas plantas possuem de liberar substâncias químicas no ambiente, capazes de afetar direta ou indiretamente o crescimento e o desenvolvimento de outros organismos (Inderjit; Duke, 2003). Esses compostos, denominados aleloquímicos, geralmente são metabólitos secundários produzidos pelas plantas e liberados por diferentes vias, como exsudação radicular, lixiviação de tecidos, volatilização e decomposição da matéria orgânica (Cheng, 2015).

Do ponto de vista ecológico, a alelopatia exerce papel importante na dinâmica populacional e na estruturação de comunidades vegetais, influenciando processos de competição, sucessão ecológica e a capacidade de estabelecimento de espécies exóticas invasoras (Callaway; Ridenour, 2004)Esse mecanismo também apresenta caráter multifuncional, visto que os aleloquímicos podem interagir não apenas com

plantas vizinhas, mas também com microrganismos e insetos associados ao sistema (Hickman et al., 2021).

Na agricultura, a alelopatia tem sido estudada como ferramenta complementar no manejo integrado de plantas daninhas, oferecendo a perspectiva de reduzir o uso de herbicidas sintéticos e favorecer sistemas de produção mais sustentáveis. No entanto, a comprovação de sua eficácia em condições de campo continua sendo um desafio, em razão da complexidade das interações entre solo, planta e microrganismos, bem como da instabilidade e rápida transformação dos aleloquímicos no ambiente (Duke, 2015).

A liberação dos aleloquímicos pode ocorrer de diferentes formas: por exsudação radicular, por lixiviação de folhas e caules, pela decomposição de resíduos orgânicos ou por volatilização (Cheng, 2015). Uma vez no ambiente, esses compostos interagem com as características físico-químicas do solo, sendo adsorvidos, transformados ou degradados por microrganismos (Kaur et al., 2009). Tais transformações podem reduzir, intensificar ou até modificar a atividade biológica inicial, o que torna a avaliação de efeitos alelopáticos em condições de campo um processo complexo (Li et al., 2017). Entretanto, a aplicação prática enfrenta limitações. Em muitos casos, resultados positivos observados em condições controladas de laboratório não se confirmam em campo, devido à rápida degradação dos aleloquímicos e à variabilidade ambiental (Duke, 2015). Assim, a alelopatia deve ser entendida não como solução isolada, mas como componente integrado em sistemas de manejo conservacionistas e diversificados.

O estudo da alelopatia remonta à antiguidade, quando já se observava que determinadas plantas exerciam efeitos inibitórios sobre outras espécies no mesmo ambiente. No entanto, o termo alelopatia foi proposto formalmente por Hans Molisch em 1937, para descrever as interações químicas entre plantas mediadas por substâncias liberadas no ambiente (Rice, 1984). A partir dessa conceituação, o interesse científico pelo tema cresceu, especialmente nas décadas de 1960 e 1970, período em que se intensificaram os estudos sobre compostos secundários e suas implicações ecológicas (Inderjit; Duke, 2003).

No Brasil, as pesquisas em alelopatia tiveram maior impulso a partir dos anos 1980, com destaque para investigações sobre a influência de resíduos vegetais em culturas agrícolas, bem como o potencial de espécies nativas e exóticas na liberação de aleloquímicos (Ferreira; Aquila, 2000). Desde então, a literatura tem consolidado a

alelopatia como uma área interdisciplinar, integrando conhecimentos da ecologia, fisiologia vegetal, química de metabólitos secundários e manejo agrícola sustentável (Cheng, 2015).

Os aleloquímicos constituem um conjunto diversificado de metabólitos secundários, cuja função primária não está associada ao crescimento e desenvolvimento direto da planta, mas sim à mediação de interações ecológicas (Singh et al., 2003). Entre os principais grupos de compostos envolvidos na alelopatia, destacam-se os fenóis, terpenos, alcaloides e flavonoides.

Os compostos fenólicos representam um dos grupos mais estudados em alelopatia, atuando na inibição da germinação e do crescimento radicular de espécies vizinhas. Sua ação está frequentemente associada à interferência em processos enzimáticos e na absorção de nutrientes (Li et al., 2010). Já os terpenos, presentes em óleos essenciais de diversas espécies, possuem alta volatilidade e podem exercer efeitos inibitórios por meio da liberação para a atmosfera ou pelo acúmulo no solo após a decomposição de resíduos vegetais (Cheng, 2015).

Os alcaloides, por sua vez, apresentam elevada diversidade estrutural e bioatividade, podendo interferir na divisão celular e em processos fisiológicos básicos das plantas receptoras (Wink, 2010). Outro grupo de relevância são os flavonoides, metabólitos com múltiplas funções ecológicas, incluindo a modulação da rizosfera, a regulação do crescimento de plantas adjacentes e a interação com microrganismos simbiontes (Dixon; Pasinetti, 2010).

Diversas espécies cultivadas apresentam potencial alelopático, sendo estudadas tanto como culturas principais quanto como plantas de cobertura no manejo agrícola. O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma das espécies mais investigadas, devido à produção do aleloquímico sorgoleona, liberado principalmente pelas raízes. Esse composto exerce forte efeito inibitório sobre a germinação e o crescimento de plantas daninhas, sendo considerado um dos exemplos mais promissores de aplicação prática da alelopatia (Santos et al., 2012).

O arroz (*Oryza sativa*) também tem sido alvo de pesquisas, sobretudo em sistemas de cultivo inundado, nos quais resíduos vegetais e exsudatos radiculares podem reduzir a emergência de plantas competidoras, como *Echinochloa crus-galli* (Kong et al., 2011). Da mesma forma, o trigo (*Triticum aestivum*) apresenta liberação de fenóis e ácidos hidroxicinâmicos associados à supressão de plantas invasoras em

rotações agrícolas, contribuindo para a diminuição da dependência de herbicidas (WU et al., 2001).

No caso do eucalipto (*Eucalyptus spp*.), estudos indicam que a queda e a decomposição de folhas liberam compostos fenólicos e terpenos capazes de inibir o estabelecimento de espécies herbáceas no sub-bosque. Esse fenômeno, embora benéfico em sistemas de monocultivo florestal por reduzir a competição, pode impactar negativamente a biodiversidade local (Zhang et al., 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o preparo do material com potencial alelopático, plantas de carinata (*Brassica carinata*), da cultivar Nujet 350, foram cultivadas na área experimental da UFFS. Durante o período de floração, a parte aérea das plantas foi coletada, acondicionada em sacos de papel e mantida em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C até atingir massa constante. Após a secagem, o material foi triturado em moinho de facas para a obtenção de um pó fino, que foi armazenado em recipiente hermético até o preparo dos extratos.

Figura 1: Plantas coletadas para obtenção do extrato



Fonte: Autor (2025).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), onde foram feitos dois experimentos separados, um para a soja e outro para o milho. Em cada experimento, havia seis tratamentos alelopáticos (cinco concentrações de extrato aquoso de carinata e um controle). A cultivar de soja usada foi a Brasmax Trovão. O híbrido de milho utilizado foi o Agroceres 9021.

Os tratamentos consistiram em cinco concentrações do extrato: 1%; 2,5%; 5%; 7,5% e 10% e um tratamento controle, utilizando apenas água destilada (concentração 0%). Os extratos foram preparados diluindo-se o material triturado da parte aérea de carinata em água destilada e filtrados para a remoção dos resíduos sólidos.

O teste de germinação foi conduzido em caixas plásticas do tipo *Gerbox* (11 × 11 × 3,5 cm), previamente higienizadas com solução de hipoclorito de sódio a 1%. O substrato utilizado foi papel de germinação (*Germitest*).

Cada unidade experimental (*Gerbox*) foi composta por 25 sementes da espécie avaliada (soja ou milho), dispostas sobre duas folhas de papel *Germitest* e coberta por outra. O substrato foi umedecido com 8 ml de cada solução de extrato correspondente ao seu tratamento, volume equivalente a aproximadamente 2,5 vezes a massa do papel seco, conforme as Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009).

As caixas Gerbox foram vedadas e mantidas em câmara de germinação tipo B.O.D. (Biochemical Oxygen Demand), com temperatura constante de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas. As sementes eram dadas germinadas quando emitiram radícula maior ou igual a 3 milímetros, seguindo as Regras Para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). As caixas ficaram na B.O.D até que a germinação se estabilizasse por 3 dias.

Figura 2: Caixas gerbox na câmara de germinação



Fonte: Autor (2025).

Durante o processo, foram realizadas contagens diárias do número de sementes germinadas em cada caixa. Além disso, as gerbox eram trocadas de posição diariamente, para garantir que todas as sementes recebessem a mesma quantidade de luz. Quando todas as unidades experimentais apresentaram estabilidade da germinação (3 dias sem alterar o número de sementes germinadas na caixa) foram realizadas as medições de comprimento de hipocótilo da soja e comprimento de radícula e parte aérea do milho.

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F, através do software SISVAR, onde foram obtidos os coeficientes de variação (CV) e o p-valor. Em caso de significância, foi realizada a análise complementar por meio de regressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MILHO

Por meio dos dados coletados no ensaio de germinação, foi possível avaliar o efeito alelopático de diferentes concentrações do extrato aquoso de *Brassica carinata* sobre sementes de milho e soja. Na Tabela 1, são apresentados os resultados para a cultura do milho (*Zea mays*), contendo os valores de porcentagem de germinação, Índice de Velocidade de Germinação (IVG), comprimento da parte aérea e comprimento da radícula.

Tabela 1: Porcentagem de germinação (%), Índice de Velocidade de Germinação (IVG), comprimento da parte aérea (mm) e da radícula (mm) de plântulas de milho (*Zea mays*) submetidas a diferentes concentrações do extrato aquoso de *Brassica carinata*.

Concentração do extrato	Germinação (%)	IVG	Comprimento da parte aérea (mm)	Comprimento da radícula (mm)
0,0%	93	6,5	10,4	45,0
1,0%	82	5,3	10,1	43,8
2,5%	87	6,0	12,0	52,5
5,0%	90	6,2	10,1	58,1
7,5%	83	4,7	10,0	28,2
10,0%	82	5,2	9,6	34,3
Média Geral	85	5,6	10,4	43,6
P-valor	0,111 ^{ns}	0,071 ^{ns}	0,999 ^{ns}	0,850 ^{ns}
CV (%)	6,1	16,7	25,3	35,0

^{ns} Não significativo pela ANOVA em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor (2025)

Diante disso, a partir da análise estatística, a ausência de efeito significativo ($p < 0,05$) dos tratamentos sobre as variáveis analisadas para a cultura do milho. Isso indica que, nas concentrações testadas, o extrato aquoso de *Brassica carinata* não exerceu efeito alelopático, seja ele inibitório ou estimulante, sobre o desenvolvimento inicial da cultura.

A ausência de efeito alelopático sugere uma tolerância da cultura do milho aos compostos secundários presentes no extrato de *B. carinata*. Por se tratar de uma gramínea de rápido estabelecimento e elevado vigor, o milho pode apresentar mecanismos fisiológicos de detoxificação ou metabolização de aleloquímicos,

reduzindo sua sensibilidade a substâncias como os glucosinolatos e seus produtos de hidrólise (isotiocianatos e tiocianatos) (Rizzardi et al., 2008; Eberlein et al., 1998).

Outra hipótese é que as concentrações utilizadas não foram suficientes para atingir o limiar de sensibilidade do milho, que, semelhantemente a outras gramíneas, tende a apresentar maior resistência aos efeitos alelopáticos quando comparado a espécies dicotiledôneas (Rice, 1984).

Os resultados obtidos com a carinata estão alinhados com o conhecimento científico estabelecido sobre o potencial alelopático das espécies da família Brassicaceae. Asaduzzaman et al. (2015) demonstraram que genótipos de canola (*Brassica napus*) possuem capacidade alelopática diferenciada, identificando compostos como álcool sinapílico, ácido p-hidroxibenzóico e flavona pentahidroxi como principais aleloquímicos responsáveis pela inibição do crescimento de plantas-alvo.

Walker et al., (2019) questionaram se a alelopatia de culturas de cobertura de inverno afeta negativamente culturas comerciais subsequentes, destacando que nem todas as interações resultam em efeitos negativos significativos. Seus resultados corroboram essa observação, demonstrando que *B. carinata* pode ser utilizada em sistemas de rotação com milho sem causar prejuízos alelopáticos à cultura subsequente.

4.2 SOJA

Diferentemente do observado para a cultura do milho, o extrato aquoso de *Brassica carinata* apresentou um forte e significativo efeito alelopático sobre a germinação e o desenvolvimento inicial das sementes de soja (*Glycine max*). A análise de variância (Tabela 2) revelou que, embora a porcentagem final de germinação não tenha apresentado diferença estatística entre os tratamentos ($p > 0,05$), o mesmo não ocorreu para o Índice de Velocidade de Germinação (IVG) e o comprimento do hipocótilo, que foram significativamente afetados ($p < 0,05$) pela aplicação do extrato.

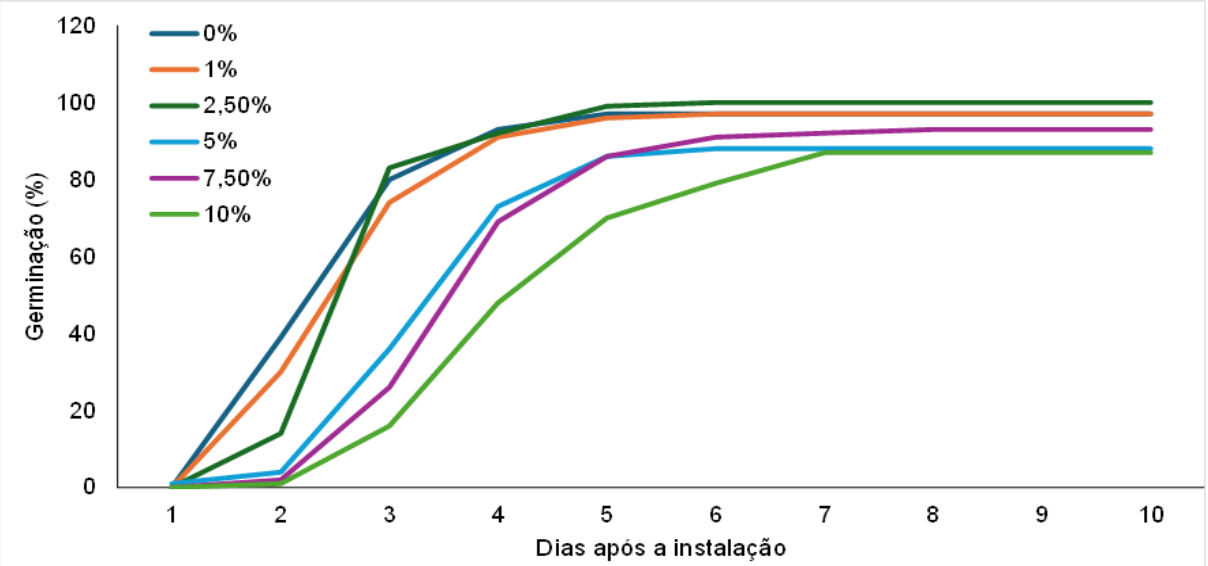
Tabela 2: Porcentagem de germinação (%), Índice de Velocidade de Germinação (IVG) e comprimento do hipocótilo (mm) de plântulas de soja (*Glycine max*) submetidas a diferentes concentrações do extrato aquoso de *Brassica carinata*.

Concentração do extrato	Germinação (%)	IVG	Comprimento do hipocótilo (mm)
P-valor	0,206 ^{ns}	0,005*	0,007*
CV (%)	4,6	17,6	23,7

* Significativo pela ANOVA em 5% de probabilidade de erro.

Fonte: Autor (2025)

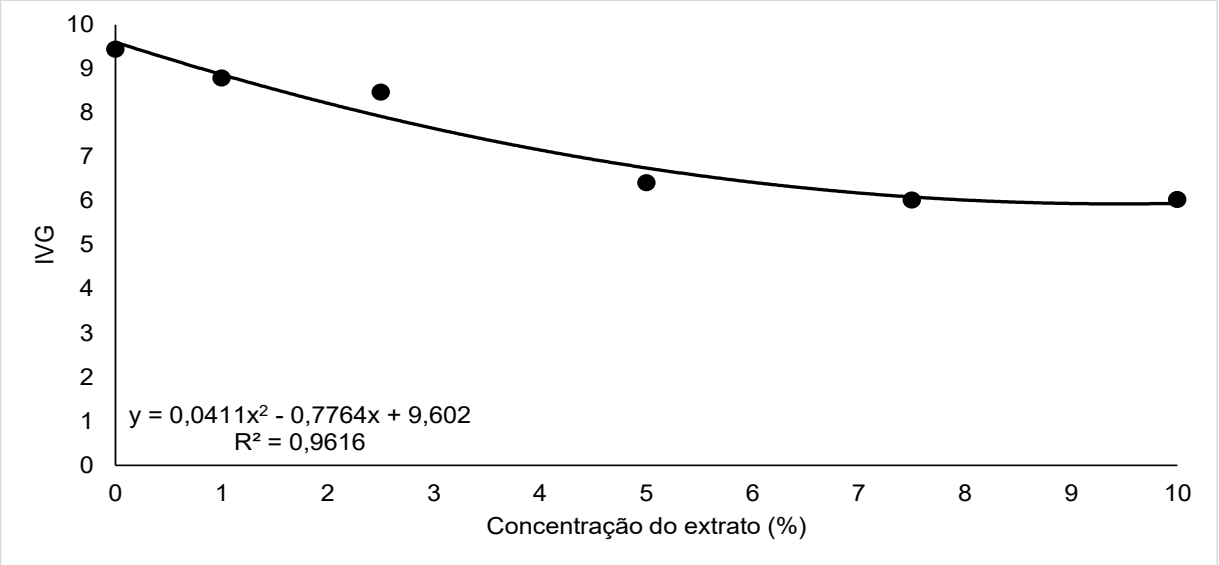
Figura 4: Porcentagem da germinação de sementes de soja submetidas em diferentes densidades de extrato aquoso de carinata



Fonte: Autor (2025).

A germinação final não se diferenciou estatisticamente, entretanto, o índice de velocidade de germinação apresentou diferença significativa, conforme indica a Figura 5. O Índice de Velocidade de Germinação (IVG) da soja foi significativamente influenciado pelas concentrações do extrato aquoso de *Brassica carinata*. A análise de regressão demonstrou um ajuste a um modelo quadrático ($y=0,0411x^2-0,7764x+9,602$), com um alto coeficiente de determinação ($R^2=0,9616$), indicando que o aumento da concentração do extrato resultou em uma redução progressiva no vigor germinativo das sementes.

Figura 5: Indice de velocidade de germinação de sementes de soja submetidas à diferentes densidades de extrato aquoso de carinata.



Fonte: Autor (2025).

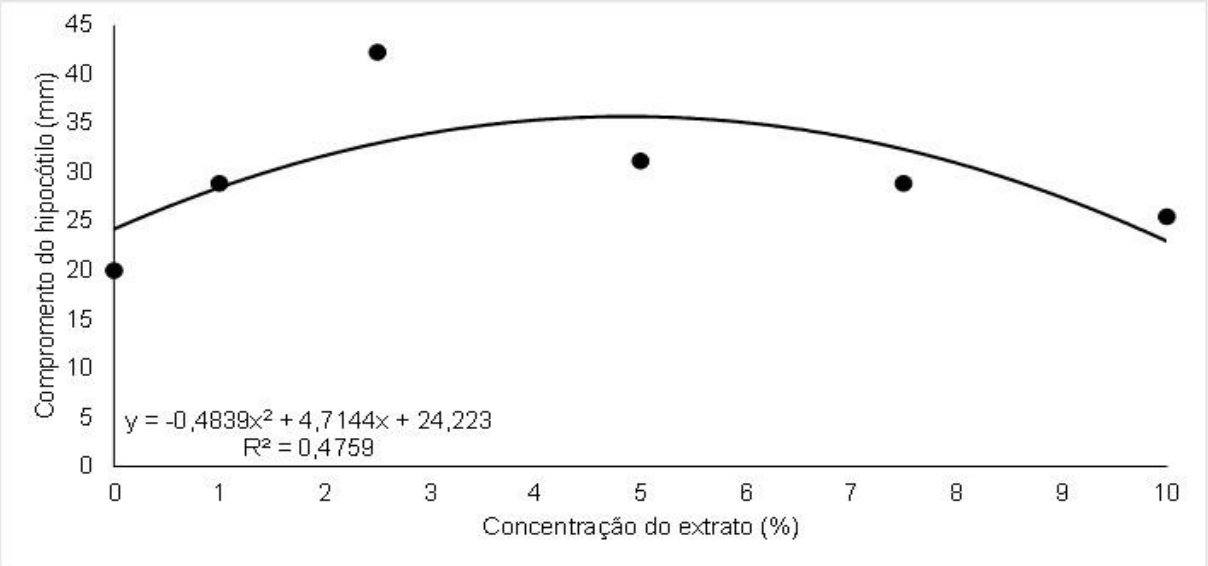
É possível observar um comportamento particular na concentração de 2,5%. Embora a tendência geral seja de inibição, o valor de IVG neste ponto específico se mostra ligeiramente superior ao esperado pela curva de decaimento. Uma hipótese para explicar este fenômeno é a dupla natureza do extrato aquoso. Além dos compostos alelopáticos, o extrato carrega consigo matéria orgânica, nutrientes e outras substâncias que, em baixas concentrações, podem atuar de forma benéfica.

Nesse sentido, é plausível que na dose de 2,5% o efeito positivo dos componentes orgânicos do extrato – agindo como uma fonte nutricional ou um bioestimulante para os processos metabólicos iniciais – tenha sido expresso, amenizando o efeito inibitório dos aleloquímicos. Este balanço entre um leve estímulo e uma leve inibição resultaria em um IVG que não se alinha perfeitamente à tendência de toxicidade crescente. No entanto, à medida que a concentração do extrato aumenta para 5%, 7,5% e 10%, o efeito alelopático dos aleloquímicos, como os glucosinolatos e seus subprodutos, torna-se fortemente dominante. A alta concentração desses compostos inibitórios supera qualquer possível benefício nutricional, resultando na acentuada queda do IVG observada.

Segundo os dados obtidos, o comprimento do hipocótilo das plântulas de soja apresentou uma resposta quadrática ($y=-0,4839x^2 +4,7144x+24,223$) à aplicação do extrato de *B. carinata* (Figura 6). Este comportamento sugere um efeito hormético, caracterizado por um estímulo ao crescimento em concentrações baixas e uma

inibição em concentrações mais altas. O ponto de máximo desenvolvimento do hipocótilo foi observado na concentração de 2,5%, superando o crescimento da própria testemunha (0%). A partir deste ponto, o aumento da concentração do extrato passou a exercer um efeito fitotóxico, reduzindo progressivamente o comprimento do hipocótilo.

Figura 6: Comprimento de hipocótilo de sementes de soja submetidas à diferentes densidades de extrato aquoso de carinata



Fonte: Autor (2025).

É importante notar que, embora o modelo quadrático seja estatisticamente significativo e biologicamente plausível para descrever a hormese, o coeficiente de determinação (R^2 = 0,4759) indica que o modelo explica aproximadamente 47,6% da variação nos dados. Isso sugere que, apesar da clara tendência observada, uma considerável variabilidade no crescimento do hipocótilo pode ser atribuída a outros fatores não controlados no experimento, o que reforça a complexidade dessas interações bioquímicas.

A explicação para este efeito bifásico reside na dupla natureza do extrato aquoso. Em concentrações baixas, como 1% e 2,5%, é provável que os compostos orgânicos e nutrientes presentes no extrato tenham atuado como bioestimulantes, promovendo a elongação celular e superando o leve efeito tóxico dos aleloquímicos. Este estímulo inicial pode ser uma resposta da planta a um estresse de baixa intensidade, ativando mecanismos de crescimento como forma de defesa.

Estes resultados se intensificam com a ideia de que a alelopatia não é um processo linear e pode depender de um delicado balanço de substâncias estimulantes e inibidoras (Belz et al., 2007). Na prática, o resultado reforça a conclusão de que, apesar de uma possível interação complexa em doses muito baixas, o efeito dominante dos resíduos de *B. carinata* sobre a soja é a redução do vigor. Um atraso na germinação e emergência, como indicado pela redução do IVG, pode deixar a cultura em desvantagem competitiva no campo, mais suscetível a estresses iniciais e à competição com plantas daninhas.

A análise conjunta dos resultados obtidos na resposta do milho e soja demonstram uma certa seletividade no potencial alelopático da carinata, enquanto na cultura do milho o efeito não é significativo, a soja demonstra ser totalmente suscetível aos efeitos, tendo seu vigor e desenvolvimento inicial prejudicados. Esses resultados mostram que a carinata pode ser uma ótima cultura antecessora do milho, visto que não implicará em seu desenvolvimento. Sua grande quantidade de massa verde produzida pode auxiliar na supressão de plantas daninhas e potencializar o cultivo do milho, entretanto é preciso fazer um manejo e planejamento adequado para não ter problemas com a cultura da soja, assim como é feito o manejo na rotação canola – soja.

5. CONCLUSÕES

Analisando os dados obtidos, pode-se verificar que, para a cultura do milho, o não houve efeitos significativos do extrato aquoso de *Brassica carinata*, o que indica que a cultura pode ser antecessora do milho no campo, visto que não teve germinação total e velocidade de germinação afetadas pela presença do extrato.

Já na cultura da soja, o extrato aquoso de carinata apresentou um efeito alelopático negativo, porém, apresentou um efeito benéfico na concentração de 2,5%. Nas demais concentrações o resultado foi evidenciado com clareza, que resultou na diminuição da velocidade de germinação das sementes, o que pode tornar o uso da carinata como cultura antecessora da soja limitante.

REFERÊNCIAS

ASADUZZAMAN, M. et al. Metabolomics differentiation of canola genotypes: toward an understanding of canola allelochemicals. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 765, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2014.00765. Acesso em: 11 out. 2025.

BELZ, R. G. Allelopathy in crop/weed interactions-An update. **Pest Management Science**, v. 63, n. 4, p. 308-326, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1002/ps.1320. Acesso em: 05 fev. 2025.

BHATTARAI, D.; KUMAR, S.; NLEYA, T. Effects of nitrogen and sulfur fertilization on growth and productivity of Brassica carinata in South Dakota. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 6, p. 4847-4856, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1002/agj2.20501. Acesso em: 14 abr. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2009. 399 p.

BRUNELI, L. V. **Entenda a origem da soja: como a planta foi domesticada na China, cruzou continentes e transformou o Brasil em protagonista global na produção dessa leguminosa**. AgroAdvance, 2025. Disponível em: https://agroadvance.com.br/blog-origem-da-soja/. Acesso em: 15 set. 2025.

CALLAWAY, R. M.; RIDENOUR, W. M. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 2, n. 8, p. 436-443, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0436:NWISAT]2.0.CO;2. Acesso em: 21 jul. 2025.

CAMPEÃO, P.; SANCHES, A. C.; MACIEL, W. R. E. Mercado Internacional de Commodities: uma análise da participação do Brasil no mercado mundial de soja entre 2008 e 2019. **Desenvolvimento em Questão**, v. 18, n. 51, p. 76-92, 2020. Disponível em: https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/8963. Acesso em: 15 set. 2025.

CHENG, F.; CHENG, Z. Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 1020, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01020. Acesso em: 10 set. 2025.

CICILIANO, L. G. et al. Quantificação e caracterização de óleos de canola, carinata e crambe produzidos no Centro-Oeste brasileiro. In: ENCONTRO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA EMBRAPA AGROENERGIA, 7., 2023, Brasília, DF. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. p. 72-76. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1158076/quantificacao-e-caracterizacao-de-oleos-de-canola-carinata-e-crambe-produzidos-no-centro-oeste-brasileiro. Acesso em: 07 abr. 2025.

COLET, F. et al. Agronomic performance of canola hybrids cultivated in a low altitude region in Southern Brazil. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 19, n. 2, p. 117-123, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.18188/sap.v19i2.23818. Acesso em: 03 mar. 2025.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE AVEIA - CBPA. **Indicações técnicas para a cultura da aveia**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. 82 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Info Agro: Safras**. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras. Acesso em: 07 abr. 2025.

DALL'AGNOL, A. **A saga da soja no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. (Documentos, 330). Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/906861/1/amelio.soja.2011.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

DIXON, R. A.; PASINETTI, G. M. Flavonoids and Isoflavonoids: From Plant Biology to Agriculture and Neuroscience. **Plant Physiology**, v. 154, p. 453-457, 2010.

DUKE, S. O. Allelopathy: Current status of research and future of the discipline: A Commentary. **Weed Science**, v. 63, n. 1, p. 1-8, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288304021_Allelopathy_Current_status_of_research_and_future_of_the_discipline_A_Commentary.

EBERLEIN, C. V.; MORRA, M. J.; GUTTIERI, M. J.; BROWN, P. D.; BROWN, J. Glucosinolate production by five field-grown Brassica napus cultivars used as green manures. **Weed Technology**, v. 12, n. 4, p. 712-718, 1998. Disponível em: https://doi.org/10.1017/S0890037X00044596. Acesso em: 30 out. 2025.

EMBRAPA. **Soja em números (safra 2024/25)**. Embrapa Soja, 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos. Acesso em: 15 set. 2025.

EMBRAPA. **Soja no Brasil**. Embrapa Soja, [s.d.]. Disponível em: https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/historia. Acesso em: 15 set. 2025.

EMBRAPA. **Aspectos técnicos e econômicos da produção de etanol de milho no Brasil,** 2025. Disponível em: https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/download/1567/1243 acesso em 15 out. 2025.

ESTÉVEZ, R. L. **Canola: aspectos técnicos para o cultivo no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/118318/1/Canola-miolo-final-08-12-14.pdf. Acesso em: 07 abr. 2025.

FERREIRA, A. G.; AQUILA, M. E. A. Alelopatia: Uma área emergente da ecofisiologia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 1, p. 175-204, 2000.

FREITAS, R. E.; MENDONÇA, M. A. A. de. Expansão Agrícola no Brasil e a Participação da Soja: 20 anos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 3, p. 497-514, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/vV6K8XSmRXzn49Khhsbww4D/. Acesso em: 15 set. 2025.

GAZZONI, D. L. A soja no Brasil é movida por inovações tecnológicas. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 3, p. 20-24, 2018. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252018000300005. Acesso em: 15 set. 2025.

GESCH, R. W. et al. Phenology and seed yield of winter camelina and carinata in the northern U.S. Corn Belt. **Industrial Crops and Products**, v. 140, art. 111624, 2019.

GUSMAN, G. S.; BITTENCOURT, A. H. C.; VESTENA, S. Alelopatia de Camelina sativa Boiss. (Brassicaceae) sobre a germinação e desenvolvimento inicial de Bidens pilosa (L.) e Glycine max (L.) Merr. **Biotemas**, Florianópolis, v. 24, n. 4, p. 17-25, 2011. Disponível em: https://periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/2175-7925.2011v24n4p17. Acesso em: 24 set. 2025.

HICKMAN, J. E.; DUKE, S. O.; DAYAN, F. E.; WESTON, L. A. Allelopathy: A multifaceted trait in invasion ecology. **Weed Research**, v. 61, n. 5, p. 295-303, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/wre.12487.

IBOYI, J. E. et al. Carinata physiological and production responses to water stress and planting date. **Industrial Crops and Products**, v. 173, art. 114138, 2021.

INDERJIT; DUKE, S. O. International allelopathy: a new journal. **Planta**, v. 217, n. 4, p. 529-530, 2003. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00425-003-1054-z.

KAUR, H. et al. Taking Ecological Function Seriously: Soil Microbial Communities Can Obviate Allelopathic Effects of Released Metabolites. **PLoS ONE**, v. 4, n. 3, p. e4700, 2009. Disponível em: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0004700.

KONG, C. H. et al. Breeding of commercially acceptable allelopathic rice cultivars in China. **Pest Management Science**, v. 67, n. 9, p. 1100-1106, 2011.

KUMAR, S. et al. Brassica carinata genotypes demonstrate potential as a winter biofuel crop in South East United States. **Industrial Crops and Products**, v. 150, p. 112353, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112353. Acesso em: 11 ago. 2025.

LI, Z. H. et al. Phenolics and plant allelopathy. **Molecules**, v. 15, n. 12, p. 8933-8952, 2010.

LI, Z. M. et al. Transformation and degradation of allelochemicals in soils and their ecological significance. **Allelopathy Journal**, v. 41, n. 1, p. 1-20, 2017.

MONQUERO, P. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Efeito de adubos verdes na supressão de espécies de plantas daninhas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 251-258, 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pd/a/6VjZJvdynr9nGngLB9F8kyL/?lang=pt. Acesso em: 24 set. 2025.

NETO, A. O. de A.; RAI, A. P. O impacto da produção de soja no crescimento e desenvolvimento socioeconômico dos municípios brasileiros. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/resr/a/qCCcrfHTMBzzqdqKssNGB6d/. Acesso em: 15 set. 2025.

NUSEED. **Características y modelo de negocio. Carinata**. [s.d.]. Disponível em: https://carinata.com.ar/. Acesso em: 07 abr. 2025.

NUSEED. **Nujet 350: Recomendações de manejo**. Nuseed. [s.d.]. Disponível em: https://nuseed.com/es/seed/nujet-350/. Acesso em: 07 abr. 2025.

PASSOS, A. M. A. dos; ALVARENGA, R. C.; SANTOS, F. C. dos. Sistema de plantio direto. In: ALVARENGA, R. C.; PASSOS, A. M. A. dos (ed.). **Agricultura de baixo**

carbono: tecnologias e estratégias de implantação. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 3. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1101765/1/Sistemaplantio.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

PEREIRA, D. G.; LARA, L. M. de; FERREIRA, F. A. Efeitos alelopáticos de extratos vegetais na germinação, colonização micorrízica e crescimento inicial de milho, soja e feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 87-96, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbcs/a/8hSK4KfWXtxbrfJLtzWGTNM/?lang=pt. Acesso em: 24 set. 2025.

RICE, E. L. **Allelopathy**. 2. ed. New York: Academic Press, 1984 (ou edição mais recente). Disponível em: https://books.google.com/books/about/Allelopathy.html?id=uqcH7AOXMCUC. Acesso em: 30 out. 2025

RIZZARDI, A.; et al. Potencial alelopático de extratos aquosos de genótipos de canola sobre Bidens pilosa. **Planta Daninha**, v. 26, n. 4, p. 717-724, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pd/a/C6JyBXKh3YSVwpSDMnJWjDd/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 30 out. 2025.

SANTOS, I. L. V. L. et al. Sorgoleone: benzoquinona lipídica de sorgo com efeitos alelopáticos na agricultura como herbicida. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 79, n. 1, p. 135-144, 2012.

SINGH, H. P. et al. Herbicidal activity of volatile oils from Eucalyptus citriodora and Cymbopogon citratus against ragweed (Parthenium hysterophorus L.). **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 289-295, 2003. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pd/a/bh8VRDq44z6qP9x7Lc9fGKt/?lang=en.

QUEIROGA, V. de P.; GOMES, J. P. **Sistema produtivo da canola (Brassica napus L. ssp. oleifera Moench)**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2002. (Circular Técnica, 52). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/480211. Acesso em: 05 jan. 2025.

SEEPAUL, R. et al. Brassica carinata: Biology and agronomy as a biofuel crop. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 4, p. 582-599, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1111/gcbb.12804. Acesso em: 19 fev. 2025.

SILVA, R. F. B. da et al. Os efeitos socioeconômicos e ambientais da produção de soja em sistemas metacoplados. **Scientific Reports**, 2020. Disponível em:

https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/65020935/artigo-mostra-efeitos-socioeconomicos-e-ambientais-da-producao-de-soja-em-mt. Acesso em: 15 set. 2025.

VIEIRA FILHO, J. E. R.; CONCEIÇÃO, J. A produção de soja e sua importância na economia brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v. 33, n. 2, p. 135-152, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/386569283_A_producao_de_soja_e_sua_importancia_na_economia_brasileira. Acesso em: 15 set. 2025.

WALKER, S. et al. Is allelopathy from winter cover crops affecting row crops?. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 4, n. 1, 2019. DOI: 10.1002/ael2.20015. Acesso em: 11 out. 2025.

WINK, M. Allelopathy: current status of research and future of the discipline: a commentary. **Allelopathy Journal**, v. 25, n. 1, p. 17-30, 2010.

ZANETTI, F. et al. *Brassica carinata* A. Braun: an alternative oilseed crop for bio-energy production in Southern Europe. **Industrial Crops and Products**, v. 46, p. 33-40, 2013.

ZHANG, L. et al. Potencial alelopático de Eucalyptus benthamii Maiden & Cambage sobre a germinação e crescimento inicial de Lolium multiflorum Lam. e Raphanus sativus L. **Planta Daninha**, v. 34, n. 1, p. 25-34, 2016. Disponível em: https://www.scielo.br/j/pd/a/S8DQD6gMvNZb45LyRmYbvXb/?lang=en. Acesso em: 30 out. 2025.