

## Potencial alelopático e fitoquímico do extrato aquoso de *Curcuma longa* L.: contribuições para a produção de bioherbicidas

*Allelopathic and phytochemical potential of the aqueous extract of Curcuma longa L.: contributions to the production of bioherbicides*

Leonardo Mendes da Silva \*<sup>1</sup>(ORCID 0000-0001-6510-9005), Marcela Emiliano Novaes Matilde <sup>1</sup>(ORCID 0009-0000-4085-0956), Fábio Júnio da Silva <sup>2</sup>(ORCID 0000-0003-2159-5907)

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil. Autor para correspondência: leonardoifsudestemg@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Barbacena, MG, Brasil.

Submissão: 21/12/2023 | Aceite: 28/02/2024

### RESUMO

A planta *Curcuma longa* L. é rica em compostos bioativos. No entanto, há poucos estudos disponíveis que investigaram sua atividade alelopática. Neste trabalho, buscamos investigar preliminarmente os principais grupos químicos com atividade alelopática e bioherbicida presentes no extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa*, bem como seu efeito na germinação e no crescimento inicial de plântulas de alface (*Lactuca sativa* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.). A análise fitoquímica foi realizada por técnicas de precipitação e colorimétricas. Para determinar o potencial alelopático do extrato, foram testadas sete concentrações (1 a 64 g L<sup>-1</sup>), além de dois grupos controle: água destilada (controle negativo) e glifosato (controle positivo). As sementes permaneceram em contato com as diferentes concentrações por 72 horas. Os parâmetros avaliados foram: porcentagem de germinação (PG), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da raiz e da parte aérea das plântulas e concentração inibitória média (IC<sub>50</sub>). Foram identificados quatro compostos com potencial alelopático: alcaloides, esteroides, flavonoides e terpenos. Os resultados do ensaio biológico revelaram que o extrato aquoso exerceu impacto limitado sobre a PG, apresentando efeitos apenas na concentração mais elevada (64 g L<sup>-1</sup>), ocasionando redução de 20,70% desse parâmetro em ambas as espécies. Além disso, verificou-se que o índice de velocidade de germinação (IVG) foi significativamente influenciado por concentrações superiores a 4 g L<sup>-1</sup> para ambas as espécies. O comprimento da raiz e da parte aérea das plântulas diminuiu com o aumento das doses. O comprimento da parte aérea foi o parâmetro mais sensível, sendo necessária a IC<sub>50</sub> de 3,73 e 7,20 g L<sup>-1</sup> para o trigo e a alface, respectivamente. Os resultados sugerem que o extrato dessa planta apresenta potencial para a produção de bioherbicidas de pós-emergência.

**PALAVRAS-CHAVE:** alelopatia; controle de plantas daninhas; compostos bioativos; fitotoxicidade.

### ABSTRACT

The plant *Curcuma longa* L. is rich in bioactive compounds. However, there are few available studies that have investigated its allelopathic activity. In this work, we sought to preliminarily investigate the main chemical groups with allelopathic and bioherbicide activity present in the aqueous extract obtained from the rhizomes of *C. longa*, as well as its effect on the germination and initial growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. Phytochemical analysis was performed using precipitation and colorimetric techniques. To determine the allelopathic potential of the extract, seven concentrations (1 to 64 g L<sup>-1</sup>) were tested, in addition to two control groups: distilled water (negative control) and glyphosate (positive control). The seeds remained in contact with the different concentrations for 72 hours. The evaluated parameters were: germination percentage (GP), germination speed index (GSI), root and shoot length of the seedlings, and median inhibitory concentration (IC<sub>50</sub>). Four compounds with allelopathic potential were identified: alkaloids, steroids, flavonoids, and terpenes. The results of the biological assay revealed that the aqueous extract had a limited impact on GP, showing effects only at the highest concentration (64 g L<sup>-1</sup>), causing a reduction of 20.70% in this parameter in both species. Additionally, it was found that the germination speed index (GSI) was significantly influenced by concentrations higher than 4 g L<sup>-1</sup> for both species. The length of the root and shoot of the seedlings decreased with increasing doses. Shoot length was the most sensitive parameter, with an IC<sub>50</sub> of 3.73 and 7.20 g L<sup>-1</sup> required for wheat and lettuce, respectively. The results suggest that the extract of this plant has potential for the production of post-emergence bioherbicides.

**KEYWORDS:** allelopathy; weed control; bioactive compounds; phytotoxicity.

## INTRODUÇÃO

As plantas daninhas representam desafios à produção agrícola, impondo restrições consideráveis. Elas competem com as culturas por recursos essenciais, como água, nutrientes, espaço e luz, além de atuarem como hospedeiras de pragas e doenças (NICHOLS et al. 2015, HORVATH et al. 2023). Essa competição compromete as culturas, resultando em perdas significativas na produção. Por exemplo, o cultivo de arroz pode sofrer reduções de 15 a 66%, enquanto no milho as perdas variam de 8,6 a 51%. Na soja, as perdas podem atingir de 50 a 76%, e no amendoim, de 45 a 70% (GHARDE et al. 2018).

No âmbito da agricultura, o manejo de plantas daninhas constitui prática agrônômica de extrema importância. Devido à escassez de mão de obra no setor agrícola, tem havido aumento significativo no uso de herbicidas sintéticos para controlar a densidade de espécies invasoras em todo o mundo. Os herbicidas sintéticos são agentes químicos elaborados em ambientes laboratoriais com o propósito de gerir ou eliminar plantas indesejadas. Estes produtos são formulados através de processos de síntese química e exibem variações em termos de estrutura molecular e mecanismo de interação com o alvo biológico (GUPTA 2018, BRILLAS 2021).

Existem dois grupos principais de herbicidas: os de pré-emergência, aplicados no solo, que inibem a germinação das plantas daninhas, e os de pós-emergência, aplicados nas folhas das plantas, que suprimem seu crescimento ou causam sua morte. Contudo, o uso indiscriminado e prolongado de herbicidas de ambas as classes desencadeou o surgimento de espécies com genótipo resistente. Além disso, essa prática tem contribuído para a presença de resíduos tóxicos em cultivos, gerando desequilíbrios ecológicos entre organismos prejudiciais e benéficos, bem como impactos negativos nos ecossistemas (AKTAR et al. 2009, GANDHI et al. 2021, MEHDIZADEH et al. 2021).

Atualmente, os bioherbicidas têm ganhado crescente reconhecimento como uma estratégia essencial no controle de plantas daninhas, emergindo como alternativas viáveis aos herbicidas sintéticos (HASAN et al. 2021, PÉREZ-DE-LUQUE 2023). Os bioherbicidas são agentes químicos de origem biológica, obtidos a partir de organismos vivos como fungos, bactérias e plantas, os quais são naturalmente produzidos durante seu ciclo de vida e são aplicados para o controle de plantas daninhas (BAILEY 2014). Sua primeira utilização remonta ao ano de 1980, tendo sido empregados inicialmente no Canadá, Estados Unidos, Ucrânia e em nações europeias, com o propósito de suprimir a germinação ou o crescimento de espécies indesejadas, sem acarretar acúmulo ou impactos ambientais adversos (BAILEY 2014, RADHAKRISHNAN et al. 2016).

Os extratos de plantas têm sido explorados como fontes promissoras para desenvolvimento de bioherbicidas em práticas agrícolas sustentáveis. Esse êxito pode ser atribuído à presença de compostos bioativos nos extratos vegetais, os quais apresentam atividade inibitória específica contra o crescimento de plantas indesejáveis. Acredita-se que tais compostos interajam seletivamente com enzimas-alvo ou receptores específicos presentes nas plantas daninhas, resultando na inibição de seu crescimento (HOSNI et al. 2013, MAURYA et al. 2022, KOSTINA-BEDNARZ et al. 2023).

Diversas espécies de plantas possuem a capacidade de secretar metabólitos conhecidos como aleloquímicos, que incluem álcoois, ácidos graxos, compostos fenólicos, flavonoides, terpenoides e esteroides. Esses compostos desempenham funções importantes na redução da reprodução, crescimento e desenvolvimento da vegetação adjacente. Ao liberar esses aleloquímicos no ambiente, as plantas podem suprimir o crescimento de outras plantas ao seu redor, fornecendo vantagem competitiva. A exploração desses aleloquímicos em bioherbicidas pode oferecer abordagem sustentável e direcionada para o controle de plantas daninhas nas lavouras (HUSSAIN 2020, DE SOUZA BARROS et al. 2021, KOSTINA-BEDNARZ et al. 2023).

Uma das espécies vegetais que demonstram potencial para a produção de bioherbicidas é a *Curcuma longa* L., conhecida popularmente como açafrão-da-terra ou cúrcuma. Nativa das regiões tropicais e subtropicais do mundo, é comumente cultivada em países asiáticos, especialmente na Índia, na China e também no Brasil. Trata-se de uma planta perene e ereta, que se destaca por sua aparência folhosa e exuberante. Pertencente à família Zingiberaceae, pode atingir até 1 metro de altura, possuindo caule curto e folhas pontiagudas de cor verde brilhante. As flores amarelas em forma de funil proporcionam um contraste vibrante contra o verde das folhas (AKRAM et al. 2010, LAL 2012, YADAV & TARUN 2017, DA SILVA et al.

2023). Os rizomas da planta são oblongos, ovais ou piriformes, frequentemente ramificados. Neles, são identificados três pigmentos curcuminoides principais: predominantemente a curcumina (60%), seguida pela desmetoxicurcumina (22%) e, em menor proporção, a bisdemetoxicurcumina (18%). Adicionalmente, são detectados compostos como o zingibereno e as tumeronas (LORENZI & MATOS 2021).

Diante do exposto, o propósito foi identificar as classes de constituintes fitoquímicos com potencial atividade alelopática presentes no extrato aquoso derivado dos rizomas da planta *C. longa*, além de investigar os efeitos desse extrato sobre a germinação e o desenvolvimento inicial de duas espécies-modelo: a alface (*Lactuca sativa* L.) e o trigo (*Triticum aestivum* L.). Espera-se que os resultados obtidos neste estudo possam contribuir para a compreensão dos efeitos da *C. longa* na germinação e desenvolvimento inicial de plântulas, bem como fornecer subsídios valiosos visando o desenvolvimento de novos bioherbicidas

## MATERIAL E MÉTODOS

### Preparo das soluções

Os rizomas frescos da planta *C. longa* foram coletados na residência de um dos autores do trabalho, localizada no município de Ressaquinha, Minas Gerais, Brasil. O material foi submetido a um processo rigoroso de seleção, sendo cuidadosamente lavado e fatiado em espessuras de dois centímetros de diâmetro com o auxílio de lâmina inoxidável. Em seguida, os rizomas foram submetidos a secagem controlada em estufa, mantida a temperatura constante de 40 °C, durante um período de 120 horas. Posteriormente, foram triturados em liquidificador industrial, e o material obtido foi peneirado com malha de 40 mesh, resultando em um pó fino.

No desenvolvimento do estudo, procedeu-se à preparação das soluções utilizando o pó obtido dos rizomas da planta. O material foi mantido em infusão durante 10 minutos, em 1000 mL de água destilada fervente, permitindo a extração das substâncias ativas presentes. Após esse processo, as soluções foram submetidas a filtração para obtenção de extratos líquidos.

Para a avaliação dos efeitos alelopáticos, foram empregadas sete concentrações distintas, obtidas a partir dos rizomas, nas proporções de 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 g L<sup>-1</sup>. Adicionalmente, dois grupos controles foram preparados: o primeiro utilizando água destilada como controle negativo e o segundo empregando o herbicida glifosato (Biocarb) numa concentração de 10%, como controle positivo, visando comparar a resposta do extrato com a obtida por meio de um herbicida comercial.

### Triagem fitoquímica preliminar

O extrato aquoso previamente obtido (concentração de 64 g L<sup>-1</sup>) passou por um processo de armazenamento em freezer a uma temperatura de -15 °C e, posteriormente, foi submetido à liofilização. Esse procedimento teve como propósito preparar o extrato para uma análise fitoquímica, com o objetivo de identificar classes de metabólitos com potencial alelopático.

Durante a análise fitoquímica, diversas classes de metabólitos foram investigadas no extrato aquoso, incluindo açúcares redutores, alcaloides, antraquinonas, cumarinas, esteroides, flavonoides, fenóis, glicosídeos, saponinas, taninos e terpenos. Os métodos utilizados para essa análise seguiram os procedimentos descritos na literatura científica (HARBORNE et al. 1999, MATOS 2009, SIMÕES et al. 2016) e foram detalhados na Tabela 1.

Após a detecção das classes químicas presentes no extrato aquoso de *C. longa*, a investigação do potencial alelopático e bioherbicida dessas classes foi realizada na literatura científica, com o propósito de compreender os mecanismos de ação de cada composto sobre a germinação e o desenvolvimento das plantas.

### Avaliação do potencial alelopático

Sementes de alface (*Lactuca sativa* var. Great Lakes) da marca TopSeed e de trigo (*Triticum aestivum*) foram adquiridas comercialmente e utilizadas como material de teste para o bioensaio. Essas espécies foram selecionadas devido à sua ampla utilização na avaliação do potencial alelopático de extratos vegetais, bem como pelas características vantajosas de rápida germinação e crescimento acelerado. Além disso, são recomendadas como organismos modelos pela Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD 2006).

Para avaliar o potencial alelopático do extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* foi realizado um experimento com delineamento inteiramente casualizado, com nove tratamentos e seis repetições. Os

tratamentos foram constituídos por sete concentrações do extrato obtido dos rizomas (1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 g L<sup>-1</sup>), incluindo dois controles (controle negativo = água destilada, controle positivo = glifosato 10%). Para cada repetição, utilizou-se uma placa de Petri contendo 10 sementes de alface ou trigo. As sementes de ambas as espécies foram dispostas sobre papel filtro umedecido com 3 mL das soluções preparadas previamente. Em seguida, as placas foram vedadas com plástico filme, posteriormente dispostas em câmara de germinação, e mantidas em temperatura constante de 24 °C, sem exposição à luz.

Tabela 1. Testes fitoquímicos preliminares realizados com o extrato aquoso de *C. longa*.

Table 1. Preliminary phytochemical tests conducted with the aqueous extract of *C. longa*.

Classe avaliada	Teste Realizado	Observação
Açúcares redutores	2 mL do extrato + 1 mL de H <sub>2</sub> O + CuSO <sub>4</sub>	Precipitado vermelho-alaranjado
Alcaloides	2 mL de extrato + Reagente de Hager's	Precipitado amarelo
Antraquinonas	2 mL do extrato + 2 ml de C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 5 mL de NH <sub>3</sub> (10%)	Coloração rosa, violeta ou vermelha.
Cumarinas	2 mL do extrato + 3 mL de NaOH (10%) + observação sob luz ultravioleta (360 nm)	Coloração amarela
Esteroides	2 mL do extrato + 2 mL de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (concentrado)	Anel de coloração marrom
Flavonoides	2 mL do extrato + Mg + 2 mL de HCl (concentrado)	Coloração laranja ou vermelha
Fenóis	2 mL do extrato + gotas de FeCl <sub>3</sub>	Coloração azul ou verde-azulada
Glicosídeos	2 mL do extrato + gotas de FeCl <sub>3</sub> + 1 mL de CH <sub>3</sub> COOH	Anel vermelhado acastanhado
Saponinas	5 mL do extrato + 5 mL de H <sub>2</sub> O + aquecimento	Formação de espuma
Taninos	2 mL do extrato + 2 mL de H <sub>2</sub> O + gotas de FeCl <sub>3</sub> (1%)	Coloração azul ou verde
Terpenos	2 mL do extrato + 2 mL de (CH <sub>3</sub> CO) <sub>2</sub> O + 2 mL de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (concentrado)	Coloração vermelha

A cada 12 horas, foram realizadas verificações para obter informações sobre a germinação das sementes, com o objetivo de determinar a porcentagem de germinação (PG) e o índice de velocidade de germinação (IVG). Após o período de 72 horas, as plântulas foram retiradas das placas de Petri e o comprimento da raiz e da parte aérea de cada plântula foi mensurado utilizando um paquímetro.

Para determinar o potencial alelopático dos extratos, foi calculada a concentração inibitória média (IC<sub>50</sub>), ou seja, a concentração que inibiu em 50% os parâmetros avaliados. Esse cálculo foi realizado utilizando o software GraphPad Prism 8 (GraphPad Software Inc.; San Diego, CA, EUA). Através desses dados, foi possível mensurar a sensibilidade das espécies e dos parâmetros avaliados em relação ao extrato de *C. longa*. Sendo que quanto menor o valor de IC<sub>50</sub>, maior a sensibilidade indicando que a espécie ou parâmetro apresentou uma resposta mais significativa à ação do extrato.

#### Análise dos dados

Os dados coletados das variáveis analisadas, que englobam a porcentagem de germinação (PG), o índice de velocidade de germinação (IVG) e o comprimento da raiz e parte aérea das plântulas, foram submetidos a análise de variância. Posteriormente, as médias obtidas foram comparadas por meio da aplicação do teste de Scott-Knott, utilizando o software estatístico SISVAR versão 5.6 (FERREIRA 2011).

## RESULTADOS

### Triagem fitoquímica

Os componentes químicos presentes no extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* foram investigados por análise fitoquímica de 11 classes, onde constatou-se a presença de 6 dessas, representadas por açúcares redutores, alcaloides, esteroides, flavonoides, saponinas e terpenoides (Tabela 2).

### Efeitos sobre a germinação

O extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* revelou efeitos discretos na porcentagem de germinação (PG) das espécies utilizadas no bioensaio. Na concentração de 64 g L<sup>-1</sup>, observou-se redução significativa de 20,70% na PG para ambas as espécies (*L. sativa* e *T. aestivum*) em comparação com o

controle negativo (água destilada) (Figura 1a e Figura 1c). Notavelmente, os resultados obtidos foram mais promissores do que o efeito exercido pelo herbicida glifosato 10% (controle positivo), o qual não apresentou inibição significativa na porcentagem de germinação para nenhuma das espécies.

Tabela 2. Classe de metabólitos secundários identificados no extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa*.

Table 2. Classes of secondary metabolites identified in the aqueous extract obtained from the rhizomes of *C. longa*.

Compostos	Resultado
Açúcares redutores	+
Alcaloides	+
Antraquinonas	-
Cumarinas	-
Esteroides	+
Fenóis	-
Flavonoides	+
Glicosídeos	-
Saponinas	+
Taninos	-
Terpenos	+

+ (Presente); - (Ausente).

No que diz respeito ao índice de velocidade de germinação (IVG), o extrato aquoso demonstrou efeito significativo na alface (*L. sativa*) a partir da concentração de 4 g L<sup>-1</sup>, resultando em redução de 32,97% em relação ao controle negativo (Figura 1b). Entretanto, é importante destacar que essa inibição foi menor quando comparada com a exercida pelo controle positivo (glifosato), o qual reduziu o IVG em 55,85%. Porém, nas maiores concentrações, a inibição exercida pelo extrato aquoso sobre o IVG da alface foi maior do que a observada para o herbicida glifosato. A concentração de 32 g L<sup>-1</sup> inibiu o IVG em 62,44%, e a concentração de 64 g L<sup>-1</sup> inibiu em 75,95%, em comparação com o controle negativo (Figura 1b).

Em relação ao trigo (*T. aestivum*), o IVG também foi afetado pelo extrato a partir da concentração de 4 g L<sup>-1</sup>, ocasionando redução significativa de 13,44% em comparação ao controle negativo. Essa inibição mostrou-se estatisticamente semelhante àquela exercida pelo herbicida glifosato, o qual reduziu o IVG em 15,44%. Novamente, nas maiores concentrações do extrato aquoso (32 e 64 g L<sup>-1</sup>), foram observadas as maiores inibições no IVG, alcançando 57,55% e 63,66%, respectivamente (Figura 1 d).

#### Efeitos sobre o crescimento inicial de plântulas

O extrato aquoso dos rizomas de *C. longa* exerceu efeitos fitotóxicos sobre as plântulas de alface (*L. sativa*) e trigo (*T. aestivum*). Na concentração de 2 g L<sup>-1</sup>, o extrato teve impacto significativo no desenvolvimento da parte aérea das plântulas de alface, com redução de 9,58%.

No entanto, essa concentração não afetou o desenvolvimento das raízes, sendo necessário alcançar concentrações acima de 4 g L<sup>-1</sup> para observar alterações nesse parâmetro. As maiores reduções no comprimento das raízes foram registradas nas concentrações de 32 e 64 g L<sup>-1</sup>, onde o comprimento das raízes foi reduzido em 83,56% e 89,79%, respectivamente, em comparação com o controle negativo (água destilada). A redução observada no comprimento da raiz em ambas as concentrações foi estatisticamente semelhante a àquela causada pelo herbicida glifosato (95,59%). Importante notar que, na concentração de 64 g L<sup>-1</sup>, não ocorreu desenvolvimento da parte aérea das plântulas de alface, o que também foi observado no grupo controle positivo (glifosato) (Figura 2a).

O comprimento da parte aérea das plântulas de trigo (*T. aestivum*) foi afetado pela concentração mais baixa avaliada (1 g L<sup>-1</sup>), promovendo redução de 20,10% em comparação com o controle negativo. Por sua vez, o comprimento das raízes foi significativamente afetado por concentrações acima de 2 g L<sup>-1</sup>, apresentando uma redução de 28,43% nessa concentração (Figura 2b). Novamente, os resultados mais significativos foram encontrados nas concentrações de 32 e 64 g L<sup>-1</sup>, sendo que a redução promovida na parte aérea das plântulas (86,15%) pela concentração de 64 g L<sup>-1</sup> se igualou estatisticamente à redução promovida pelo herbicida glifosato (93,62%).

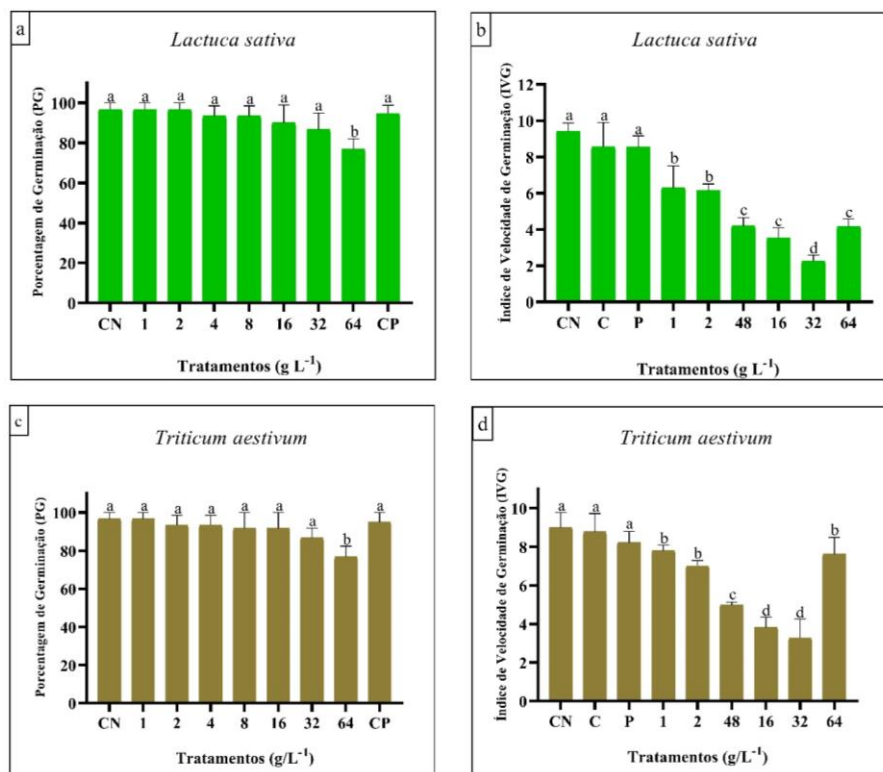


Figura 1. Porcentagem de germinação (PG) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de alface (*L. sativa*) e trigo (*T. aestivum*) expostas a diferentes concentrações (1 a 64 g L<sup>-1</sup>) do extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* e aos controles (CN = água destilada e CP = glifosato). Os dados encontram-se expressos em médias  $\pm$  desvio padrão. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si (Teste de Scott-Knott 5%).

Figure 1. Germination percentage (GP) and germination speed index (GSI) of lettuce (*L. sativa*) and wheat (*T. aestivum*) seeds exposed to different concentrations (1 to 64 g L<sup>-1</sup>) of the aqueous extract obtained from the rhizomes of *C. longa* and the controls (CN = distilled water and CP = glyphosate). The data are expressed as means  $\pm$  standard deviation. Means followed by the same letters do not differ statistically from each other (Scott-Knott test, 5%).

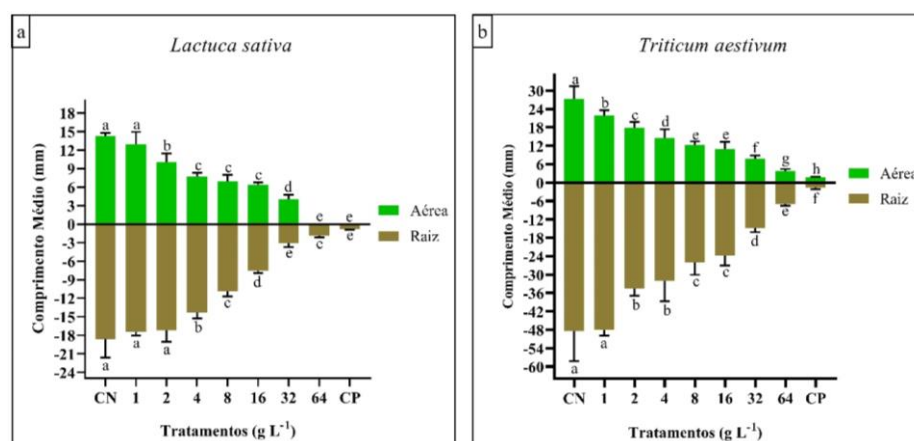


Figura 2. Comprimento médio (mm) de plântulas de alface (*L. sativa*) e trigo (*T. aestivum*) expostas a diferentes concentrações (1-64 g L<sup>-1</sup>) do extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* e aos controles (CN = água destilada e CP = glifosato). Os dados encontram-se expressos em médias  $\pm$  desvio padrão. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si (Teste de Scott-Knott 5%).

Figure 2. Average length (mm) of lettuce (*L. sativa*) and wheat (*T. aestivum*) seedlings exposed to different concentrations (1-64 g L<sup>-1</sup>) of the aqueous extract obtained from the rhizomes of *C. longa* and the controls (CN = distilled water and CP = glyphosate). The data are expressed as means  $\pm$  standard deviation. Means followed by the same letters do not differ statistically from each other (Scott-Knott test, 5%).

### Dados sobre inibição

No âmbito deste estudo, as concentrações testadas não foram capazes de inibir a germinação em 50%. Consequentemente, não foi possível estabelecer a concentração inibitória média (IC<sub>50</sub>) para esta variável.

No entanto, o extrato exerceu efeitos significativos no índice de velocidade de germinação (IVG) das plantas empregadas no teste alelopático. Entre estas, *L. sativa* mostrou-se particularmente sensível, necessitando de uma concentração de 7,12 g L<sup>-1</sup> para reduzir em 50% este índice (Figura 3a). Em relação ao comprimento das raízes das plântulas, a espécie *T. aestivum* demonstrou maior sensibilidade, com IC<sub>50</sub> de 6,97 g L<sup>-1</sup> (Figura 3d). Por fim, quanto ao comprimento da parte aérea, *T. aestivum* também se destacou, exigindo uma concentração de 3,73 g L<sup>-1</sup> para causar redução de 50% neste parâmetro (Figura 3f).

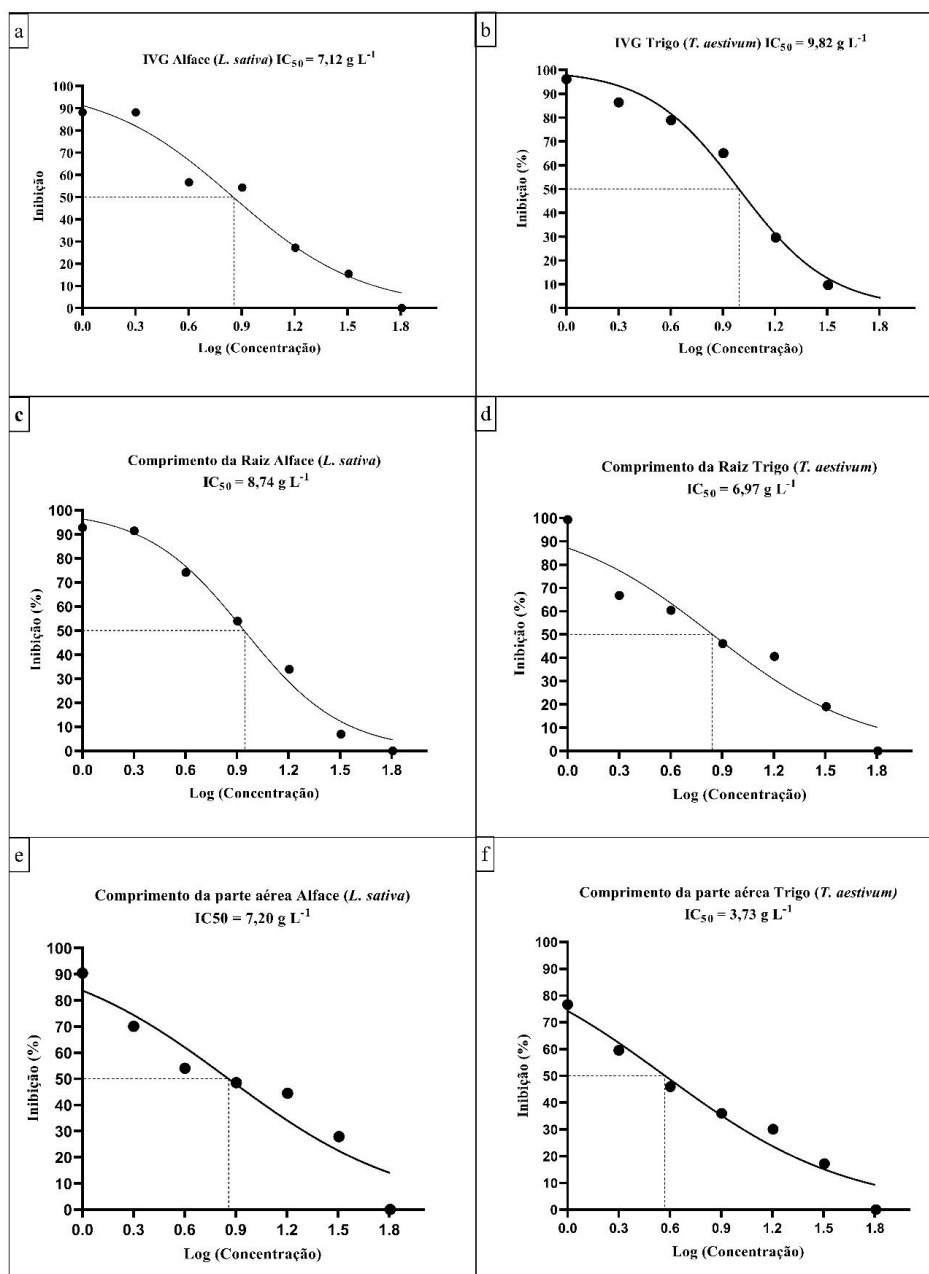


Figura 3. Concentração inibitória média (IC<sub>50</sub>) do extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* frente os parâmetros avaliados: índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da raiz e da parte aérea das plântulas de alface e trigo.

Figure 3. Mean inhibitory concentration (IC<sub>50</sub>) of the aqueous extract obtained from the rhizomes of *C. longa* concerning the evaluated parameters: germination speed index (GSI), root length, and shoot length of lettuce and wheat seedlings.

## DISCUSSÃO

A opção pelo uso da água como líquido extrator foi fundamentada em estudos anteriores que demonstraram os teores de extrativos nos rizomas de *C. longa*. Esses estudos relataram teores de 12,22% em água, 9,20% em álcool e 7,31% em éter (m/m) (CHANDEL et al. 2011). UTHAYARASA et al. (2010) realizaram extrações sequenciais com solventes de diferentes polaridades nos rizomas de *C. longa*, identificando compostos específicos em cada extrato. No extrato hexânico, nenhuma das classes avaliadas (alcaloides, flavonoides, glicosídeos cardiotônicos, saponinas, taninos e terpenoides) foi constatada. Já o extrato diclorometânico e o acetato de etila testaram positivo para alcaloides, glicosídeos cardiotônicos e terpenoides. O extrato etanólico mostrou a presença de taninos, alcaloides, flavonoides e terpenoides. O extrato hidroalcoólico dos rizomas de *C. longa* apresentou classes de compostos alcaloides, açúcares redutores, glicosídeos, taninos, resinas, saponinas, esteróis e óleos fixos (GOVIND 2011).

Uma pesquisa adicional verificou que o extrato aquoso testou positivo para flavonoides e alcaloides, mas não continha glicosídeos, açúcar redutor, taninos e saponinas (CHAKRABORTY & SENGUPTA 2012). Nossos achados corroboram com essas descobertas, uma vez que também identificamos a presença de alcaloides e flavonoides no extrato aquoso de *C. longa*. No entanto, em contraste com o estudo mencionado, observamos a existência de açúcares redutores e saponinas no extrato aquoso (Tabela 2). Essas discrepâncias podem estar relacionadas ao genótipo específico da planta, sua idade, época e local de coleta, dentre outros fatores que influenciam a produção de metabólitos secundários.

Dentre as seis classes de compostos identificados no extrato aquoso (Tabela 2), quatro delas têm sido objeto de estudos sobre seu potencial alelopático e capacidade de serem utilizados como bioherbicidas. Essas classes incluem alcaloides, esteroides, flavonoides e terpenoides (PIRES & OLIVEIRA 2001).

Os alcaloides são compostos nitrogenados amplamente encontrados em várias fontes, incluindo plantas, fungos, bactérias e animais (CUSHNIE et al. 2014). Em plantas com sementes, especialmente nas raízes, frutas e caules, sua presença é bem documentada, e cerca de 31.000 compostos alcaloides já foram identificados (SHI et al. 2014). Devido às suas propriedades altamente ativas, os alcaloides desempenham papel proeminente na alelopatia. Estudos têm mostrado que essas substâncias podem induzir estresse oxidativo nas plântulas, gerando espécies reativas de oxigênio e afetando o metabolismo e a fisiologia das plantas-alvo (OGUNSUSI et al. 2018). Além disso, alcaloides causam danos às plântulas expostas, levando à necrose (LEDERER et al. 2004). Outros compostos alcaloides foram identificados como inibidores do fotossistema II, interferindo nos processos fotossintéticos (DAYAN et al. 2015).

Certos alcaloides apresentam também propriedades citotóxicas que estão associadas à sua interação direta com componentes vitais das células, tais como DNA, RNA e enzimas, incluindo telomerasas, polimerases e topoisomerasas (SAJITHA et al. 2018, FILIPPIN et al. 2018).

Os esteroides desempenham funções essenciais nas plantas, com diversos papéis funcionais. Os fitoesteróis, por exemplo, são componentes fundamentais da membrana celular das plantas, regulando sua fluidez e permeabilidade, garantindo assim a integridade e o funcionamento adequado da membrana. Outro grupo de esteroides presentes nas plantas são os alcaloides esteroidais, que possuem propriedades repelentes de insetos e podem funcionar como barreiras químicas contra patógenos, contribuindo para a defesa das plantas contra organismos nocivos (SIMÕES et al. 2016). Estudos sobre o potencial alelopático dos esteroides mostraram que eles podem afetar a eficiência quântica dos centros de reação do fotossistema II em folhas, impactando o crescimento e o desenvolvimento das plantas-alvo. Além disso, os esteroides podem afetar as membranas celulares, inibindo etapas do processo de mitose e prejudicando a formação adequada da parede celular após a divisão celular (MACÍAS et al. 2019).

Os flavonoides são compostos com diversas funções biológicas, incluindo proteção contra radiação ultravioleta (UV) e fitopatógenos, sinalização durante a nodulação, regulação da fertilidade masculina, transporte de auxina e coloração floral para atrair polinizadores. Além disso, eles contribuem para a exibição das cores em plantas, ajudando a preservar as células das folhas contra danos fotooxidativos e aumentando a eficiência da recuperação de nutrientes durante a fase de senescência (FALCONE FERREYRA et al. 2012, SIMÕES et al. 2016, NABAVI et al. 2020). Em relação à alelopatia, os flavonoides têm a capacidade de afetar a degradação da auxina por meio das enzimas IAA oxidases e peroxidases, o que pode impactar o crescimento das raízes das espécies-alvo. Estudos têm demonstrado que combinações de flavonoides podem inibir o crescimento radicular, reduzir a frequência de divisão celular nas regiões meristemáticas da



raiz e suprimir a formação de pelos radiculares e estatocistos nas células do ápice radicular (WESTON & MATHESIUS 2013).

Os terpenoides desempenham funções essenciais nas interações inter e intraespecíficas das plantas, atuando como agentes comunicativos e de defesa em reação a estresses bióticos e abióticos (THIMMAPPA et al. 2014, SILVA et al. 2016). Estudos têm investigado as características ecológicas dos terpenoides e seus efeitos alelopáticos nas plantas, revelando que podem causar inibição, promoção ou ação autotóxica na germinação de sementes e no crescimento de plântulas (CIMMINO et al. 2014, ALWATTAR et al. 2023). A toxicidade dos terpenoides pode estar associada a mecanismos como: inibição da formação de ATP, interrupção da atividade hormonal, alquilação de nucleófilos, complexação com proteínas, ligação com esteróis livres e inibição da respiração (BACHHETI et al. 2020).

Apesar da análise química evidenciar a presença de compostos com atividades alelopáticas no extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa*, existem poucos estudos na literatura que tenham avaliado tal potencial e a aplicação dessa planta para a produção de bioherbicidas. No presente estudo, verificou-se que o referido extrato teve efeito limitado sobre a porcentagem de germinação das sementes de alface e trigo. Para alcançar redução significativa desse parâmetro em ambas as espécies, foi necessária a exposição a concentração de 64 g L<sup>-1</sup>. No entanto, é importante ressaltar que essa concentração resultou inibição superior àquela causada pelo herbicida glifosato, um agente de pós-emergência (conforme demonstrado na Figura 1a e Figura 1c). Estudos têm demonstrado que a germinação de sementes é menos sensível a compostos alelopáticos em comparação com outros processos, como o crescimento das raízes e da parte aérea da planta (SHAHRAJABIAN et al. 2019, WEI et al. 2020, WANG et al. 2022). Esse fato pode estar relacionado à estrutura das sementes, tais como tegumento, pericarpo, cariopse e envoltório seminal, os quais possuem permeabilidade seletiva e protegem as sementes de agentes estressores (BEWLEY et al. 2012, TAIZ & ZEIGER 2017), como compostos alelopáticos.

AKTER et al. (2018) revelou resultados discrepantes em relação aos achados deste estudo. Eles investigaram o efeito do extrato metanólico derivado dos rizomas de *C. longa* na germinação de alface (*L. sativa*), rabanete (*Raphanus sativus* L.), agrião (*Lepidium sativum* L.) e picão (*Bidens pilosa* L.), observando inibição significativa desse parâmetro nas concentrações de 0,5; 1 e 2 mg mL<sup>-1</sup>. Com base nesses resultados, os autores discutiram a viabilidade de utilizar a planta *C. longa* para a produção de bioherbicidas. A discrepância entre este estudo e o de AKTER et al. (2018) pode estar associada ao método de extração empregado para obter os princípios ativos dos rizomas. Neste estudo, optou-se pelo uso do extrato aquoso devido à sua simplicidade, facilidade de obtenção e ausência de solventes tóxicos. Entretanto, essa escolha pode ter influenciado a concentração e a disponibilidade dos compostos ativos presentes no extrato.

De maneira distinta dos resultados de germinação observados, o extrato aquoso dos rizomas de *C. longa* evidenciou interferência significativa no desenvolvimento inicial das plântulas, tanto nas raízes quanto na parte aérea, sendo essa inibição dose-dependente. Algumas concentrações do extrato apresentaram efeitos inibitórios estatisticamente similares aos provocados pelo herbicida glifosato a 10% (Figuras 2a e 2b). Esses resultados podem estar diretamente correlacionados à presença de compostos químicos identificados no extrato aquoso (Tabela 2), tais como alcaloides, esteroides, flavonoides e terpenoides. Essas substâncias, conforme discutido anteriormente, possuem potencial alelopático.

A *C. longa* apresenta em seus rizomas quatro curcuminoides específicos: i-hidrobisdemetoxicurcumina, bisdemetoxicurcumina, desmetoxicurcumina e curcumina, os quais possivelmente exerceram influência na inibição do crescimento das plântulas de alface e trigo observada neste estudo (Figura 2). No estudo conduzido por YANO et al. (2000), dois desses compostos (bisdemetoxicurcumina e curcumina) foram identificados no extrato aquoso dos rizomas em níveis reduzidos. Na pesquisa realizada por AKTER et al. (2018), o extrato metanólico dos rizomas revelou a presença de todos os curcuminoides mencionados. Esses compostos demonstraram capacidade inibitória sobre o crescimento das plântulas de picão (*B. pilosa*). O autor ressaltou ainda que a presença de grupos metoxila nestes curcuminoides pode potencializar sua atividade alelopática.

Além desses compostos, os rizomas de *C. longa* contêm três sesquiterpenos importantes: ar-turmerona,  $\beta$ -turmerona e  $\alpha$ -turmerona, documentados na literatura por sua influência no desenvolvimento de plantas daninhas após a emergência (IBÁÑEZ & BLÁZQUEZ 2019). Estudos também apontam que o extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* demonstra efeitos citotóxicos para *Allium cepa* L., reduzindo a divisão celular nas zonas meristemáticas e o comprimento das raízes expostas (DA SILVA et al. 2023).

Portanto, é provável que a presença desses constituintes químicos no extrato, combinada com a atividade citotóxica associada, tenha exercido supressão sobre o crescimento das plântulas de *L. sativa* e *T. aestivum*.

Nos bioensaios alelopáticos conduzidos, foi determinada a concentração inibitória média (IC50) para cada parâmetro avaliado. Dentre os parâmetros analisados, verificou-se que o comprimento da parte aérea das plântulas se mostrou o mais sensível, demandando concentrações menores do extrato para atingir a inibição deste parâmetro em 50% para ambas as espécies (Figura 3). Esta constatação possui relevância substancial no contexto da aplicação do produto em ambientes agrícolas, uma vez que a parte aérea das plantas representa a principal rota de entrada para herbicidas (DAYAN 2019), tornando-se um ponto crítico para o controle eficiente de plantas daninhas. Adicionalmente, a escolha de concentração menor do extrato para alcançar a mesma resposta inibitória resulta na redução da quantidade de produto necessária, o que o torna mais viável economicamente e mais alinhado com práticas ambientalmente sustentáveis.

Embora as atividades farmacológicas de *C. longa* sejam amplamente reconhecidas, há uma lacuna significativa nos estudos relacionados à sua atividade alelopática e bioherbicida. Os resultados deste estudo apresentam perspectivas promissoras para o desenvolvimento de novas moléculas dotadas de capacidade fitotóxica. No entanto, são necessários estudos em campo, considerando fatores abióticos e bióticos. Além disso, outras espécies devem ser empregadas nos testes biológicos, inclusive plantas daninhas. Adicionalmente, é crucial realizar testes de toxicidade para determinar se o extrato não apresenta potencial acumulativo e se não é tóxico para a microfauna do solo ou para organismos não alvos, como insetos.

## CONCLUSÃO

O extrato aquoso obtido dos rizomas de *C. longa* revelou a presença de quatro classes importantes de compostos alelopáticos: alcaloides, esteroides, flavonoides e terpenoides.

No ensaio biológico, o extrato aquoso teve impacto limitado na porcentagem de germinação das plântulas de alface e trigo, demandando concentrações elevadas para inibir significativamente este parâmetro. Entretanto, demonstrou efeitos promissores sobre o crescimento das plântulas de trigo e alface, mesmo nas menores concentrações avaliadas. Entre os parâmetros utilizados para avaliar a alelopatia, foi constatada maior sensibilidade na parte aérea das plântulas de ambas as espécies.

Os resultados evidenciam o potencial da *C. longa* como possível fonte de substâncias fitotóxicas para a produção de bioherbicidas. Isso, por sua vez, poderia implicar na redução do uso de herbicidas sintéticos, o que, em última análise, contribuiria para um manejo mais sustentável das plantas daninhas.

## REFERÊNCIAS

- AKTAR MDW et al. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary toxicology* 2: 1-12.
- AKTER J et al. 2018. Plant growth inhibitors in turmeric (*Curcuma longa*) and their effects on *Bidens pilosa*. *Weed Biology and Management* 18: 136-145.
- AKRAM M et al. 2010. *Curcuma longa* and curcumin: a review article. *Rom J Biol Plant Biol* 55: 65-70.
- ALWATTAR MT et al. 2023. Terpenoids as Natural Allelopathic Compounds in Plants. *Rafidain Journal of Science* 32: 106-116.
- BACHHETI A et al. 2020. Allelochemical effects of plant respiration and on oxygen discrimination by alternative oxidase. In: MÉRILLON JM & RAMAWATK K. (Ed.) *Co-Evolution of Secondary Metabolites*. Reference Series in Phytochemistry. Berlin: Springer. p.441-457.
- BAILEY KL. 2014. The bioherbicide approach to weed control using plant pathogens. In: ABROL DP. *Integrated Pest Management*. Cambridge: Academic Press. p. 245-266.
- BEWLEY JD et al. 2012. *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*. 3 ed. New York: Springer.
- BRILLAS E. 2021. Recent development of electrochemical advanced oxidation of herbicides. A review on its application to wastewater treatment and soil remediation. *Journal of Cleaner Production* 290: 125841.
- CHANDEL et al. 2011. Standardization of some herbal antidiabetic drugs in polyherbal formulation. *Pharmacognosy research* 3: 49-56.
- CHAKRABORTY B & SENGUPTA M. 2012. Boosting of nonspecific host response by aromatic spices turmeric and ginger in immunocompromised mice. *Cellular immunology* 280: 92-100.
- CIMMINO A et al. 2014. Phytotoxic terpenes produced by phytopathogenic fungi and allelopathic plants. *Natural product communications* 9: 1934578X1400900330.
- CUSHNIE TPT et al. 2014. Alkaloids: An overview of their antibacterial, antibiotic-enhancing and antivirulence activities. *International journal of antimicrobial agents* 44: 377-386.

- DA SILVA LM et al. 2023. Avaliação da toxicidade, citotoxicidade e genotoxicidade do infuso dos rizomas de *Curcuma longa* L. (Zingiberaceae). *Revista Fitos* 17: 9-17.
- DAYAN FE et al. 2015. Sarmentine, a natural herbicide from Piper species with multiple herbicide mechanisms of action. *Frontiers in Plant Science* 6: 1-11.
- DAYAN FE 2019. Current status and future prospects in herbicide discovery. *Plants*, 8: 341.
- DE SOUZA BARROS VM et al. 2021. Herbicides of biological origin: A review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 96: 288-296.
- FALCONE FERREYRA ML et al. 2012. Flavonoids: biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Frontiers in plant science* 3: 222.
- FERREIRA DF. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia* 35: 1039-1042.
- FILIPPIN KJ et al. 2018. Cytotoxic alkaloids from *Pogonopus tubulosus*: G2/M cell cycle arrest and inhibition of DNA topoisomerase II $\alpha$  by isotubulosine. *Phytotherapy Research* 32: 943-948.
- GHARDE Y et al. 2018. Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India. *Crop Protection* 107: 12-18.
- GANDHI K et al. 2021. Exposure risk and environmental impacts of glyphosate: Highlights on the toxicity of herbicide co-formulants. *Environmental Challenges* 4: 100149.
- GOVIND P. 2011. Active principles and median lethal dose of *Curcuma longa* Linn. *International Research Journal of Pharmacy* 2: 239-241.
- GUPTA PK. 2018. Toxicity of herbicides. In: GUPTA RC. *Veterinary toxicology. Basic and Clinical Principles*. Cambridge: Academic Press. p. 553-567.
- HARBORONE JB et al. 1999. *Phytochemical dictionary: handbook of bioactive compounds from plants*. 2. ed. London: Taylor & Francis.
- HASAN M et al. 2021. Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants* 10: 1212.
- HORVATH DP et al. 2023. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. *Trends in Plant Science* 28: 567-582.
- HOSNI K et al. 2013. Secondary metabolites from *Chrysanthemum coronarium* (Garland) flowerheads: Chemical composition and biological activities. *Industrial Crops and Products* 44: 263-271.
- HUSSAIN WS. 2020. Allelopathy: Allelochemicals a brief review. *Plant Archives* 20: 5556-5560.
- IBÁÑEZ MD & BLÁZQUEZ MA. 2019. Ginger and turmeric essential oils for weed control and food crop protection. *Plants* 8: 59.
- KOSTINA-BEDNARZ M et al. 2023. Allelopathy as a source of bioherbicides: challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 22: 1-34.
- LAL J. 2012. Turmeric, curcumin and our life: A review. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences* 1: 11-17.
- LEDERER B et al. 2004. Phytotoxic activity of middle-chain fatty acids II: peroxidation and membrane effects. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 80: 151-156.
- LORENZI H & MATOS FJA. 2021. *Plantas medicinais no Brasil. Nativas e exóticas*. 3.ed. Plantarum: Nova Odessa.
- MACÍAS FA et al. 2019. Recent advances in allelopathy for weed control: From knowledge to applications. *Pest management science* 75: 2413-2436.
- MATOS FJA. 2009. *Introdução à Fitoquímica Experimental*. 3. ed. UFC: Fortaleza.
- MAURYA P et al. 2022. Medicinal and aromatic plants as an emerging source of bioherbicides. *Current Science* 122: 258-266.
- MEHDIZADEH M et al. 2021. Herbicide residues in agroecosystems: Fate, detection, and effect on non-target plants. *Reviews in Agricultural Science* 9: 157-167.
- NABAVI SM et al. 2020. Flavonoid biosynthetic pathways in plants: Versatile targets for metabolic engineering. *Biotechnology advances* 38: 107316.
- NICHOLS V et al. 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field crops research* 183: 56-68.
- OECD. 2006. Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Section 2. Paris: OECD Publishing.
- OGUNSUSI M et al. 2018. Allelopathic effects of alkaloid fraction of *Crotalaria retusa* Linn on growth and some biochemical parameters of bean seedlings (*Phaseolus vulgaris*). *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry* 10: 1-9.
- PÉREZ-DE-LUQUE A. 2023. Can nanotechnology improve the application of bioherbicides? *Pest Management Science* 1: 1-7.
- PIRES NM & OLIVEIRA VR. 2001. Alelopatia. In: OLIVEIRA JRRS, CONSTANTIN J, INOUE MH (Ed.). *Biologia e Manejo de Plantas Daninhas*. Curitiba: Omnipax. p.145-185.
- RADHAKRISHNAN R et al. 2016. *Enterobacter* sp. I-3, a bio-herbicide inhibits gibberellins biosynthetic pathway and regulates abscisic acid and amino acids synthesis to control plant growth. *Microbiological research* 193: 132-139.
- SAJITHA TP et al. 2018. Mechanism of resistance to camptothecin, a cytotoxic plant secondary metabolite, by *Lymantria*

- sp. larvae. *Journal of chemical ecology* 44: 611-620.
- SHAHRAJABIAN MH et al. 2019. Germination and seedlings growth of corn (*Zea mays* L.) to allelopathic effects of rice (*Oryza sativa* L.). *Tropical Plant Research* 6: 152-156.
- SHI QIU et al. 2014. Natural alkaloids: basic aspects, biological roles, and future perspectives. *Chinese Journal of Natural Medicines* 12: 401-406.
- SILVA LN et al. 2016. Plant natural products targeting bacterial virulence factors. *Chemical reviews* 116: 9162-9236.
- SIMÕES CMO et al. 2016. *Farmacognosia: do produto natural ao medicamento*. 1.ed. Porto Alegre: Artmed.
- TAIZ L & ZEIGER E. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento Vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed.
- THIMMAPPA R et al. 2014. Triterpene biosynthesis in plants. *Annual review of plant biology* 65: 225-257.
- UTHAYARASA K et al. 2010. Antibacterial activity and qualitative phytochemical analysis of medicinal plant extracts obtained by sequential extraction method. *International Journal of Integrative Biology* 10: 76-81.
- WANG C et al. 2022. Effects of autotoxicity and allelopathy on seed germination and seedling growth in *Medicago truncatula*. *Frontiers in Plant Science* 13: 908426.
- WEI M et al. 2020. Combined allelopathy of Canada goldenrod and horseweed on the seed germination and seedling growth performance of lettuce. *Landscape and Ecological Engineering* 16: 299-306.
- WESTON LA & MATHESIUS U. 2013. Flavonoids: their structure, biosynthesis and role in the rhizosphere, including allelopathy. *Journal of chemical ecology* 39: 283-297.
- YADAV RP & TARUN G. 2017. Versatility of turmeric: A review the golden spice of life. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 6: 41-46.
- YANO S et al. 2000. Antiallergic activity of *Curcuma longa* (I) Effectiveness of extracts containing curcuminoids. *Natural Medicines* 54: 318-324.