

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**INFLUÊNCIA DO MODO DE APLICAÇÃO DE FLUMIOXAZIN SOBRE VIAS
METABÓLICAS NA CULTURA DO ALHO**

Mírian dos Reis Delgado
Magister Scientiae

**RIO PARANAÍBA - MINAS GERAIS
2024**

MÍRIAN DOS REIS DELGADO

**INFLUÊNCIA DO MODO DE APLICAÇÃO DE FLUMIOXAZIN SOBRE VIAS
METABÓLICAS NA CULTURA DO ALHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Frederico Garcia Pinto

Coorientador: Marcelo Rodrigues dos Reis

**RIO PARANAÍBA - MINAS GERAIS
2024**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Universidade Federal de Viçosa - Campus Rio Paranaíba

T

D352r
2024
Delgado, Mirian dos Reis, 1993-
Influência do modo de aplicação de flumioxazin sobre vias metabólicas na cultura do alho / Mirian dos Reis Delgado. – Rio Paranaíba, MG, 2024.
18f: il. (algumas color.).

Orientador: Frederico Garcia Pinto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Produção Vegetal, 2024.

Referências bibliográficas: 24-26.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvcrp.2024.008>

1. *Allium*, herbicidas, aplicação, metabolômica. I. Pinto, Frederico Garcia, 1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Produção Vegetal. Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal). III. Título.

632.954

MÍRIAN DOS REIS DELGADO

**INFLUÊNCIA DO MODO DE APLICAÇÃO DE FLUMIOXAZIN SOBRE VIAS
METABÓLICAS NA CULTURA DO ALHO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de junho de 2024.

Assentimento:

Mírian dos Reis Delgado
Autora

Frederico Garcia Pinto
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 08/12/2025 às 14:09:00 e pelo orientador em 08/12/2025 às 14:31:21. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **D23J.RE7D.NYID** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

DELGADO, Mírian dos Reis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2024.
INFLUÊNCIA DO MODO DE APLICAÇÃO DE FLUMIOXAZIN SOBRE VIAS METABÓLICAS NA CULTURA DO ALHO
. Orientador: Frederico Garcia Pinto. Coorientador: Marcelo Rodrigues dos Reis.

Um dos desafios do cultivo do alho é o controle de plantas daninhas devido às suas características fisiológicas, resultando em altas populações no campo. Este trabalho objetivou avaliar volumes de calda e modos de aplicação do herbicida Flumyazin no controle de plantas daninhas e investigar seus efeitos nas injúrias foliares, bacterioses, produtividade do alho e metabólitos das folhas. As vazões de aplicação avaliadas foram 150, 300, 600 e 750 L/ha, em métodos de aplicação unidirecional e bidirecional. Embora todos os tratamentos tenham controlado as plantas daninhas, não houve diferença significativa entre eles. As maiores injúrias foliares ocorreram com a aplicação de 150 L/ha. A análise metabolômica indicou alterações nas vias metabólicas do alho com essa vazão, em ambos os métodos de aplicação. Não houve influência dos tratamentos na incidência de bacterioses, nem na produtividade do alho.

Palavras-chave: Allium, herbicidas, aplicação, metabolômica

ABSTRACT

DELGADO, Mírian dos Reis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2024. **REFINEMENT OF THE USE OF FLUMIOXAZIN IN GARLIC CROPPING.** Adviser: Frederico Garcia Pinto. Co-adviser: Marcelo Rodrigues dos Reis.

One of the challenges in garlic cultivation is weed control due to their physiological characteristics, resulting in high populations in the field. This work aimed to evaluate spray volumes and application methods of the herbicide Flumyazin in weed control and investigate its effects on leaf injuries, bacterial diseases, garlic productivity, and leaf metabolites. The application rates evaluated were 150, 300, 600, and 750 L/ha, in unidirectional and bidirectional application methods. Although all treatments controlled the weeds, there was no significant difference between them. The greatest leaf injuries occurred with the application of 150 L/ha. Metabolomic analysis indicated alterations in the metabolic pathways of garlic with this flow rate, in both application methods. There was no influence of the treatments on the incidence of bacterial diseases, nor on garlic productivity.

Keywords: Allium, herbicides, application, metabolomics

**INFLUÊNCIA DO MODO DE APLICAÇÃO DE FLUMIOXAZIN SOBRE VIAS
METABÓLICAS NA CULTURA DO ALHO**

Mírian dos R. Delgado*

AMIPA – Associação Mineira dos Produtores de Alho. Rua Coronel Fonte Boa, n527, sala
03, São Gotardo, MG, tel:+55 34 9672 6278,

miriandosreisdalgado@gmail.com

Frederico G. Pinto

UFV-CRP; Rodovia BR 230 KM 7, Rio Paranaíba - MG, 38810-000, frederico.pinto@ufv.br

Marcelo R. Reis

IPACER-Ipacer - Instituto de Pesquisa Agrícola do Cerrado LTDA

Fazenda Abaete dos Mendes Br 354 Km 309,

Zona Rural, Rio Paranaíba MG, reisagro@gmail.com.

RESUMO

Um dos desafios do cultivo do alho é o controle de plantas daninhas devido às suas características fisiológicas, resultando em altas populações no campo. Este trabalho objetivou avaliar volumes de calda e modos de aplicação do herbicida Flumyazin no controle de plantas daninhas e investigar seus efeitos nas injúrias foliares, bacterioses, produtividade do alho e metabólitos das folhas. As vazões de aplicação avaliadas foram 150, 300, 600 e 750 L/ha, em métodos de aplicação unidirecional e bidirecional. Embora todos os tratamentos tenham controlado as plantas daninhas, não houve diferença significativa entre eles. As maiores injúrias foliares ocorreram com a aplicação de 150 L/ha. A análise metabolômica indicou alterações nas vias metabólicas do alho com essa vazão, em ambos os métodos de aplicação. Não houve influência dos tratamentos na incidência de bacterioses, nem na produtividade do alho.

Palavras-chave: *Allium*, herbicidas, aplicação, metabolômica

INTRODUÇÃO

O alho (*Allium sativum* L.) é uma hortaliça originária da Ásia Central que começou a ser cultivada há mais de 5000 anos pelos árabes, egípcios e hindus¹. Segundo a ANAPA – Associação Nacional dos Produtores de Alho, o Brasil consome aproximadamente 30 milhões de caixas de alho, das quais 16 milhões são importadas², para atender o consumo per-capita de aproximadamente 1,5 Kg por habitante ao ano. Os maiores fornecedores de alho para o país são a China e a Argentina. De acordo com a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) em 2019 o Brasil importou 165, 45 mil toneladas de alho produzidos principalmente na China e Argentina³.

No Brasil, os maiores estados produtores são Goiás, Minas Gerais, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, representando 90% da produção do país⁴. De acordo com o IBGE, 2021, a produtividade média nestes estados apresenta uma grande variação. Em Goiás e Minas Gerais, os rendimentos estão entre 12 e 16 toneladas por hectare, enquanto nos estados da região Sul a produção varia entre 5 e 9 toneladas⁵. Portanto, para garantir a alta produtividade e qualidade dos bulbos, diversas técnicas de manejo são aplicadas, fato que torna essa cultura onerosa.

Um dos grandes desafios no manejo da cultura do alho é o controle de plantas daninhas. As daninhas são plantas que possuem alta taxa de germinação, longa sobrevivência e um ciclo de vida curto, além de serem tolerantes a diversos estresses bióticos e abióticos^{6,7}. As maiores famílias de plantas daninhas são Asteraceae, Poaceae, Amaranthaceae e Fabaceae^{8,9}. As características fisiológicas das daninhas as tornam importantes competidoras por espaço, luz, nutrientes e umidade, interferindo no desenvolvimento saudável e normal da cultura^{10,11}, principalmente quando surgem dentro da janela de 60 dias iniciais do desenvolvimento do alho¹². Além disso as próprias características do alho, como o ciclo, crescimento reduzido da parte aérea e sistema radicular pouco profundo resulta em uma baixa cobertura do solo, possibilitando maior espaço das entre linhas. A necessidade de altos volumes de irrigação e de nutrientes também contribui para o crescimento das plantas daninhas^{13,14}. O conjunto de todos estes fatores tornam o alho uma cultura de baixa capacidade de competição, podendo levar a uma queda de até 94,8% da produtividade¹⁴.

Devido aos danos físicos causados nas plantas de alho durante o controle mecânico de plantas daninhas, o controle químico com herbicidas é o método mais utilizado para o controle

¹⁵. No entanto, a cultura do alho é sensível aos herbicidas, que a depender das condições de aplicação, pode resultar em fitotoxicidade e baixa produtividade ^{16,17}.

O uso de herbicidas de pré-plantio, pré-emergência ou pós-emergência podem ser eficientes para o controle de daninhas do alho, entretanto o desafio é identificar as doses e o tempo de aplicação apropriados tanto para o controle quanto em relação ao custo benefício. Atualmente, além de não haver muitos produtos registrados para o alho, não existem muitos estudos acerca da seletividade e efeitos dos herbicidas, tornando a prática de controle praticamente empírica ¹⁵.

O Flumioxazin 500 SC (*N*-[7-fluoro-3,4-dihidro-3-oxo-4-prop-2-ynyl-2H-1,4-benzoxazin-6-yl] cyclohex-1-ene-1,2- dicarboxamide), do grupo de herbicidas E é um inibidor da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX ou PPO), registrado para o uso de pré-emergência de algumas culturas, como o algodão (*Gossypium hirsutum* L.), batata (*Solanum tuberosum* L.), soja (*Glycine max* L.), amendoim (*Arachis hypogaea* L.), alfafa (*Medicago sativa* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) ^{18,19}. Atualmente existem 22 herbicidas inibidores da PPO, devido à variedade de moléculas com atividades que prejudicam essa enzima ²⁰. O mecanismo de ação destes herbicidas se baseia no bloqueio da atividade da PPO, que causa o extravasamento do protopofirinogênio IX do cloroplasto para o citosol, que é então convertido a protoporfirina IX²¹. Quando a molécula formada reage com a luz, a formação do oxigênio singleto causa uma cascata de reações incluindo a perodixidação dos lipídios, levando à desestruturação da membrana plasmática ²².

Embora o controle químico tenha sido o método mais utilizado no controle de plantas daninhas¹², existem alguns aspectos importantes que influenciam nos efeitos dos herbicidas nas culturas, como as doses aplicadas; espécies de plantas daninhas¹³; métodos e equipamento de aplicação e condições edafoclimáticas¹⁴. Além disso, o processo evolutivo natural das plantas daninhas resulta no surgimento de resistência aos herbicidas usuais. Até o ano de 2017 haviam 480 relatos de biótipos de plantas daninhas com resistência a herbicidas, envolvendo 251 espécies e 163 ingredientes ativos¹⁵. Todos esses fatores são determinantes no custo de produção anual das produções agrícolas.

Em 2022, o custo de produção de um hectare de alho foi de aproximadamente R\$200.000,00 na principal região produtora de alho no país, Região de São Gotardo, Minas Gerais⁴. A cada safra torna-se essencial buscar alternativas que possam gerar redução de custos

para o produtor, assim, a tecnologia de aplicação de defensivos torna-se uma ferramenta fundamental na otimização da operação e custos. Portanto, considerando a escassez de trabalhos voltados para o uso de herbicidas e das tecnologias de aplicação na cultura do alho, bem como a importância de determinar as doses e efeitos dos herbicidas no alho, o objetivo deste estudo é avaliar diferentes volumes de calda de aplicação combinado com o modo de aplicação do Flumyazin no controle de plantas daninhas e investigar os efeitos do herbicida nas injúrias foliares, incidência de bacterioses e na produtividade total na cultivar Ito de alho.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Unidade Experimental do IPACER – Instituto de Pesquisa Agrícola do Cerrado, localizada no município de Rio Paranaíba-Minas Gerais, durante a safra da cultura do alho em 2022. De acordo com a classificação climática de Köppen predomina-se na bacia do rio Paranaíba o clima tropical, quente em todas as estações do ano (temperatura média mensal $\geq 18^\circ \text{C}$), com inverno seco¹⁶. Os resultados da análise química realizada na área da instalação do experimento estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados da análise química do solo da área de instalação do experimento. (Extratores: P, K, Cu, Fe, Mn e Zn – Mehlich-1; S – fosfato monocálcico em ácido acético; B – água quente. Prof. de amostragem: 0 a 30 cm).

pH (H ₂ O)	P	K	S	Ca	Mg	CTC	B	Cu	Fe	Mn	Zn	P-rem	MO
6,8	56,9	112,5	10	5,3	1,3	8,4	0,4	2	39,5	16,7	4,5	15	2,8

O plantio do alho (*Allium sativum*, Amaryllidaceae) variedade Ito foi realizado no dia 27 de março de 2022, e a colheita ocorreu em 14 de julho do mesmo ano. O experimento foi conduzido utilizando o delineamento experimental de blocos casualizados (DBC), com cinco repetições. Cada parcela consistiu de três linhas duplas de 8 metros cada. Os blocos foram representados por canteiros com 1,25 m de comprimento e 0,15 m de altura. As unidades experimentais foram compostas por três fileiras duplas com espaçamento de 0,10 m e 0,35 m entre as linhas, totalizando 3 metros de comprimento. Cada parcela ocupou uma área total de 3,75 m².

Foram realizadas duas aplicações do herbicida Flumyazin em todos os tratamentos, utilizando a dose de 20 mL/ha. Essas aplicações ocorreram nas folhas 2 e 4 das plantas, correspondendo ao dia 16 e 30 após o plantio (DAP). O volume de calda utilizado variou entre 150, 300, 600 e 750 L/há, e a aplicação foi feita utilizando um pulverizador costal pressurizado

de CO₂ equipado com pontas de jato plano (AVI 110.02). As pontas foram espaçadas a cada 0,50 m. A pressão de trabalho durante a aplicação foi de 276 kPa, e a velocidade de deslocamento foi mantida a 2,0 m/s. Foi realizada a capina manual dos tratamentos em que a eficácia de controle apresentou notas abaixo de 70% ao longo do ciclo da cultura. Essa medida foi adotada para evitar que os efeitos da matocompetição interferissem na produtividade e na classificação dos bulbos de alho. Além disso, foi realizada uma aplicação geral na área antes da emergência das plantas, utilizando 0,3 L/ha de Goal e 0,03 L/há de Flumyzin. O sistema de irrigação utilizado foi por aspersão.

É importante destacar que as condições ambientais durante as duas aplicações do Flumyzin estavam de acordo com as recomendações agrônômicas para a aplicação de produtos fitossanitários, ou seja, a temperatura era inferior a 25°C, a umidade relativa do ar era superior a 55% e não havia ventos²³.

As avaliações realizadas basearam-se na quantificação de plantas daninhas na área de cultivo. Foi avaliada a porcentagem de controle das plantas daninhas, assim como as injúrias causadas nas plantas de alho, nos dias 7, 14, 21 e 28 dias após aplicação (DAA) dos tratamentos. Utilizou-se a escala visual da Sociedade Brasileira de Plantas Daninhas para essas avaliações. Nessa escala, o valor 0 representou a ausência total de plantas daninhas e ausência total de injúrias, respectivamente¹⁷. Após as aplicações, procedeu-se à quantificação de bacteriose. Durante o ciclo da cultura, foram coletadas amostras de folhas para realização da análise metabolômica.

A colheita do alho foi realizada em 14 de julho de 2022. Após a colheita e o processo de cura, procedeu-se à classificação dos bulbos, levando em consideração as classificações comercial e total, de acordo com os padrões regionais estabelecidos, utilizando uma malha de classificação. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias das fontes foram comparadas utilizando o teste de Scott-Knott a 10% de significância.

Análise Metabolômica

Foram coletadas amostras de folhas de 5 plantas para cada tratamento. As amostras foram armazenadas em nitrogênio líquido, seguida de maceração até obter um pó fino. A partir disso, amostras de 100 mg foram transferidas para microtubos (Eppendorf, EUA) e foram adicionados 2 mL de solução extratora composta de metanol (MeOH), clorofórmio (CHCl₃) e água ultrapura numa proporção de 3:1:1. O padrão interno Adonitol Purex foi adicionado à solução extratora em concentração de 50 µL.mL⁻¹. Após a agitação, 1 mL do sobrenadante foi

transferido para novos microtubos e adicionou-se 300 μL de Hexano (P.A.). Em seguida, as amostras foram mantidas em repouso por 3 minutos e 500 μL do meio foram retirados e colocados em microtubos para secagem em concentrador de amostras a 40 °C ao longo de 16 horas.

Após a secagem das amostras, as mesmas foram mantidas no congelador até o momento de derivatização, etapa que se segue pela adição de 50 μL de hidrocloreto de metoxiamina, previamente diluído em piridina (20 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$), a 37 °C. Após 2 horas de incubação, 50 μL de BSTFA (Bis(trimetilsilil) trifluoroacetamida) foram adicionados. As amostras foram mantidas em repouso a 37 °C por 30 minutos para garantir a completa derivatização. Em seguida, as alíquotas derivatizadas foram transferidas para frascos de 2 mL contendo inserções redutoras de volume de 200 μL , preparadas para análise por GC-MS.

Análise das amostras

A análise foi conduzida em um cromatógrafo gasoso acoplado a um espectrômetro de massas (GCMS-QP2010, Shimadzu, Kyoto, Japão), utilizando a coluna capilar DB-5MS (30 m \times 250 μm diâmetro interno). A temperatura de injeção de amostras foi mantida a 250 °C, A separação cromatográfica iniciou-se a 80 °C por 2 minutos, seguida de um aumento de 5 °C. min^{-1} até atingir 250 °C, mantida por 8 minutos, com um fluxo constante de gás hélio de 1,0 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ durante todo o processo. O volume de injeção foi de 1 μL com um split de 20:1. Foi realizada a varredura do espectro de massas no intervalo de 40 a 650 m/z em modo de scan completo, com 5 scans por segundo. Foi aplicado um corte de solvente de 3 minutos, considerando o tempo de retenção da piridina utilizada na etapa de derivatização. As temperaturas de interface e da fonte de íons utilizadas foram de 280 °C. A voltagem do detector foi de 1,2 kV e o modelo de impacto de elétrons (EI) foi selecionado para ionização dos metabólitos em 70 eV. Um padrão de alcanos (C9-C30) foi utilizado para controle de qualidade e cálculo dos índices de retenção, A identificação dos compostos foi realizada com base na biblioteca NIST Mass Spectral Library 2017, aceitando compostos identificados com até 85% de similaridade e valores de m/z correspondentes.

Processamento de dados

Os dados brutos de GC-MS foram processados utilizando o software MS-DIAL v. 4.9 (prime.psc.riken.jp), passando por etapas de processamento, alinhamento, deconvolução e identificação. Para identificar os metabólitos, adotou-se uma abordagem comparativa utilizando

as bibliotecas de espectros de massa FiehnLib e NIST 2014 como referência, visando anotar compostos com uma similaridade de $\geq 85\%$, aumentando a confiança na identificação dos metabólitos nas amostras de café.

A análise dos dados foi realizada no software Metaboanalyst v. 6.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>), onde os dados foram normalizados e as análises estatísticas e de vias metabólicas foram conduzidas. Para minimizar a perda de dados, os valores ausentes foram imputados com um valor pequeno equivalente à metade do valor positivo mínimo no conjunto de dados original, preservando o máximo de informações possível. A comparação do conteúdo de metabólitos entre os grupos de amostras de café foi realizada através do teste T de Student, considerando um valor de $p < 0,05$ como estatisticamente significativo. Após a identificação de todos os metabólitos estatisticamente significativos ($p < 0,05$), uma análise de vias metabólicas foi conduzida usando o Metaboanalyst v. 6.0, com base na biblioteca de vias metabólicas de *Arabidopsis thaliana* do Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das plantas daninhas presentes na área em que o estudo foi conduzido revelou a existência de sete espécies distintas, apresentando diferentes níveis de abundância, totalizando 249,3 plantas por m² (Tabela 2).

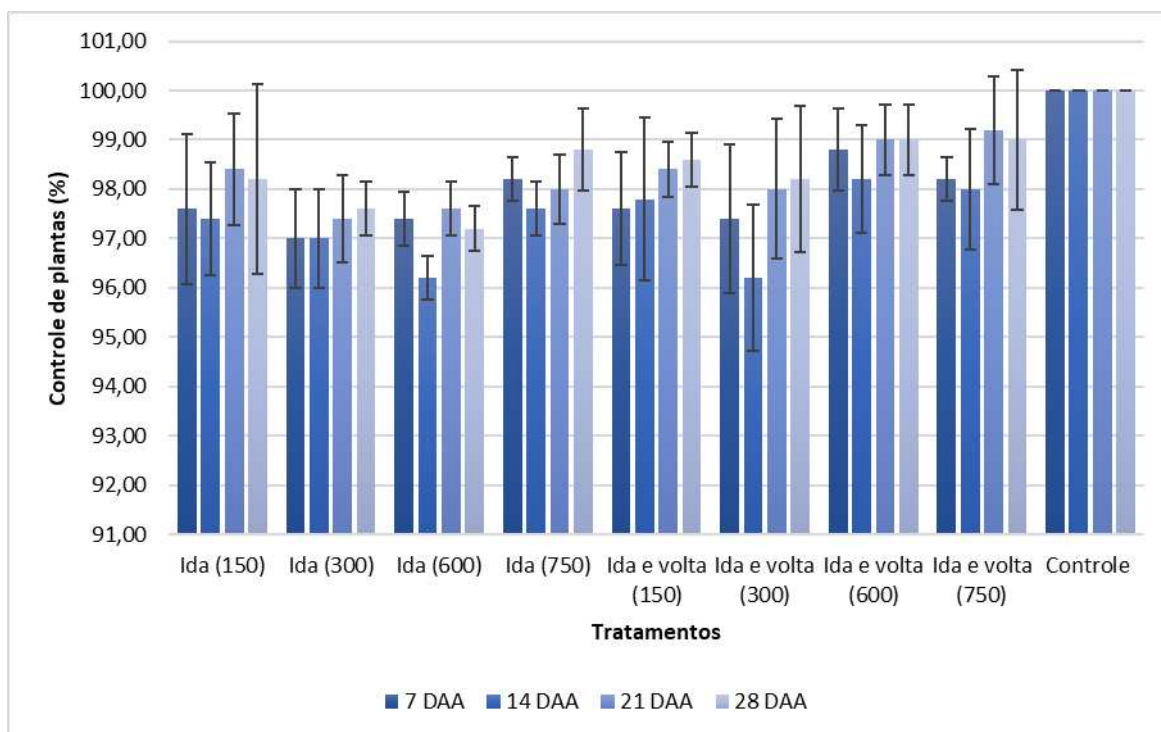
Tabela 2. Espécies de plantas daninhas e abundância por m² na área de estudo.

nome comum	nome científico	nº de plantas por m ²
Capim pé de galinha	<i>Eleusine indica</i>	76,4
Trapoeiraba	<i>Commelina</i> ssp. L	13,3
Picão preto	<i>Bidens pilosa</i>	11,1
Joá de capote	<i>Nicandra physaloides</i>	45,8
Estrelinha	<i>Melampodium perfoliatum</i>	19,4
Corda de viola	<i>Ipomoeas</i> pp.	11,1
Caruru	<i>Amaranthus</i> spp.	72,2
total		249,3

De modo geral, não houve diferenças significativas no controle de plantas daninhas (96 – 99%) com o aumento de vazão e técnicas de aplicação diferentes (Gráfico 1). No entanto, foi observada uma leve tendência de aumento do controle de plantas daninhas com a técnica de aplicação ida e volta para todos os volumes de vazões avaliados.

O controle das plantas daninhas observado neste estudo pode ser atribuído à dose elevada utilizada nos tratamentos. A aplicação foi realizada em estádios iniciais das plantas daninhas, o que também favorece o controle, principalmente pelo mecanismo de ação da flumioxazina, que é a inibição da atividade da enzima protoporfirinogênio oxidase (protop), sendo recomendado aplicação de pré e pós emergência ²⁴. A eficácia da dose recomendada da flumioxazina no controle de plantas daninhas nas cultivares Ito e Chonan foi avaliada anteriormente ¹⁵. Verificou-se um controle eficiente após a aplicação, sendo que, especificamente para cultivar Chonan, o herbicida demonstrou um efeito superior na supressão da emergência das plantas daninhas. Entretanto, as doses elevadas neste estudo foram determinadas para induzir e avaliar os efeitos da fitotoxicidade no surgimento de bacterioses e na produtividade comercial do alho.

Gráfico 1. Controle de plantas daninhas (%) com aplicação de flumioxazina nas vazões de 150, 300, 600 e 750 L/há após 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA).

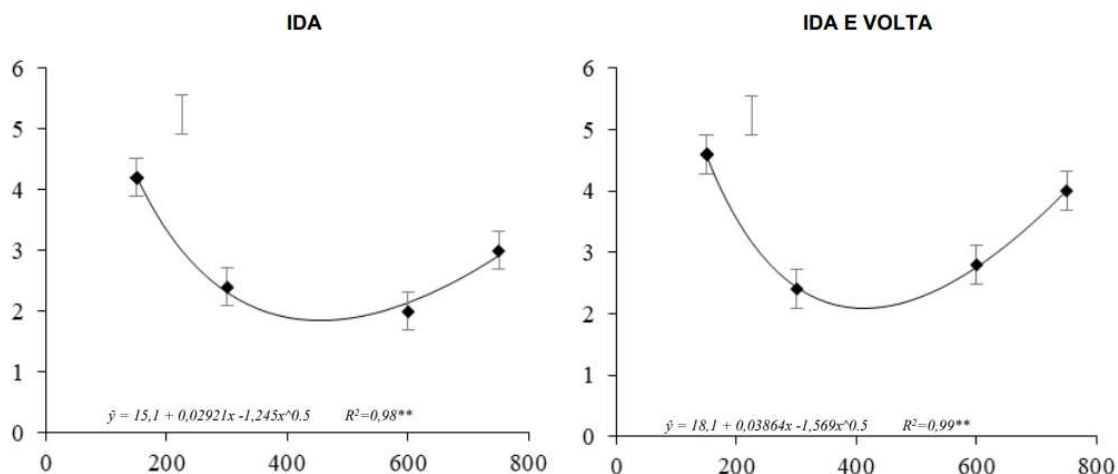


Foram observadas lesões mais severas nas folhas quando aplicadas em vazões menores (150 L/ha). Com exceção da vazão de 300 L/ha, a técnica de pulverização de ida e volta acarretou em uma maior toxicidade na planta (Figura 2). A partir da vazão de 300L/ha, o volume de calda exerceu uma influência limitada na toxicidade da cultura, principalmente na aplicação unidirecional. O maior volume testado resultou em danos mais significativos quando aplicado

duas vezes. Esses resultados indicam que o volume de calda empregado deve ser de, no mínimo, 300 L/ha, preferencialmente através de uma única aplicação. Além disso, volumes elevados (superiores a 600 L/ha) aparentemente não proporcionam uma redução significativa dos danos quando comparados a volumes menores.

Neste estudo, observou-se que as maiores injúrias ocorreram quando foi utilizada a vazão de 150 L/ha (Gráfico 2), tanto na aplicação unidirecional quanto na aplicação de ida e volta. Essas injúrias podem ser explicadas pela concentração mais elevada do herbicida na vazão menor, resultando em um efeito fitotóxico mais pronunciado nestes tratamentos. Os mesmos fatores explicam a maior quantidade de injúrias observadas para a maioria dos tratamentos na aplicação de ida e volta comparado a aplicação unidirecional.

Gráfico 2. Nível de injúrias nas plantas de alho de acordo com a escala visual da Sociedade Brasileira de Plantas Daninhas nas vazões de 150, 300, 600 e 750 L/há nos tratamentos unidirecional e ida e volta de aplicação de flumioxazina.



A ação inibitória da flumioxazina resulta no acúmulo de protoporfirinogênio IX, uma molécula altamente reativa na presença de luz e oxigênio. Essa reatividade leva à produção de oxigênio singleto e radicais livres, que têm capacidade de oxidar os lipídios das membranas celulares, acarretando em danos para as plantas²⁵. O alho é particularmente sensível a diversos produtos, portanto, as condições de aplicações e a escolha da cultivar devem ser cuidadosamente consideradas para evitar a fitotoxicidade e a redução da produtividade^{16,17}.

Nas análises metabolômicas foram encontrados 368 metabólitos na comparação das folhas do tratamento que recebeu a vazão de 150L/ha no método somente ida com o grupo controle. Entre esses metabólitos 177 apresentaram diferença estatisticamente significativa

entre as suas intensidades relativas ($p < 0,05$). A análise de *heatmap*, que se baseia no agrupamento hierárquico de metabólitos que diferiram significativamente entre os tratamentos, indicou o agrupamento dos dois grupos com base nos principais metabólitos (Figura 1a). Doze vias metabólicas afetadas por estes metabólitos que diferenciam os dois grupos foram identificadas através da avaliação de enriquecimento das vias metabólicas com base nos compostos significativamente diferentes (Figura 1b).

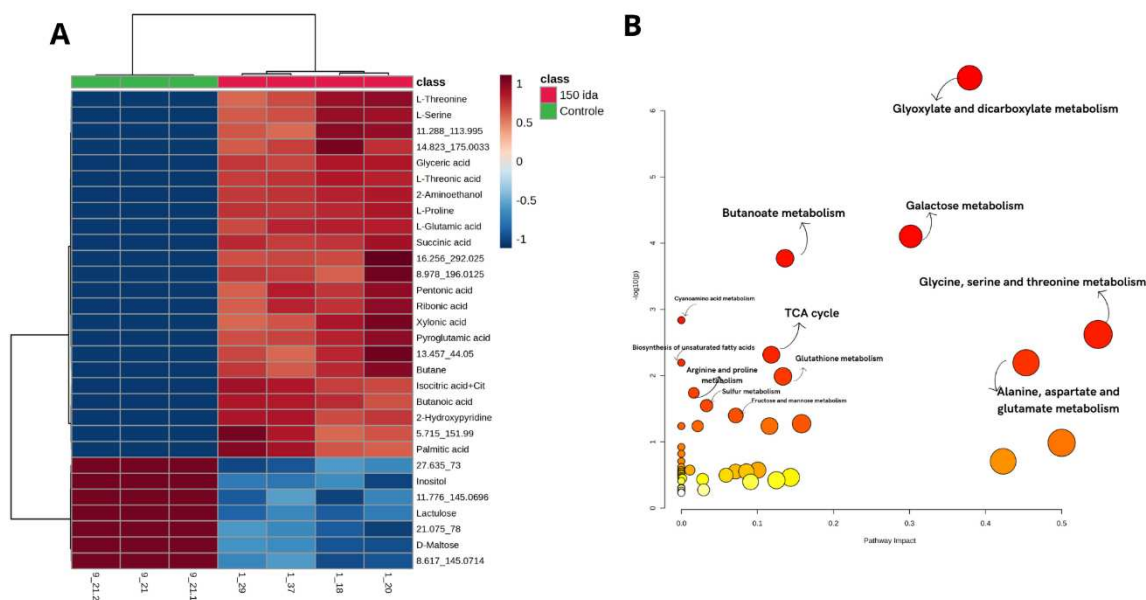


Figura 1. A) *Heatmap* dos 30 principais metabólitos com diferença significativa ($p < 0,05$) entre o controle e 150 L/ha no método ida. **B)** Principais vias metabólicas ($p < 0,05$) com impactos dos metabólitos significativos.

A via metabólica do glioxilato e do dicarboxilato apresentou influência de 7 compostos encontrados na análise, essa é uma via abiótica que pode ser relacionada às condições de estresse nas plantas e desempenha papel fundamental no balanceamento durante situações de desordem no metabolismo realizando o transporte de energia para aumento de tolerância da planta (Xu et al., 2018). O ácido glutâmico ($p = 1,08.10^{-5}$, FC = 14,268), aumentado no grupo que recebeu aplicação de 150 L/ha no método apenas ida, está presente no metabolismo do glioxilato apresenta função na biossíntese de outros aminoácidos e também das clorofilas²⁶.

As vias da Alanina, Aspartato e Glutamato são curtas e geram diretamente produtos como oxaloacetato e piruvato que, assim como os produtos da via do metabolismo do butanoato, estão relacionados ao ciclo do ácido tricarboxílico (TCA).^{27,28} A via leva a descarboxilação do glutamato produzindo o γ -aminobutirato (GABA) ($p = 6,07.10^{-3}$, FC = 19,684) que é oxidado

pelo succinato ($p = 1,18.10^{-5}$, $FC = 209,29$), o acúmulo de GABA pode ser associado a funções como proteção e sinalização, além de desempenhar papel no equilíbrio carbono-nitrogênio e mediar respostas nas células vegetais ²⁹. Vias como a da arginina e prolina estão relacionadas ao metabolismo do nitrogênio essencial para produção de proteínas nas plantas, e metabólitos como a prolina atuam como sequestrante de espécies reativas de oxigênio (ROS) em estados de estresse ³⁰. Assim como as vias da Glicina, serina e treonina que na hipótese de ³¹ apresentam acúmulo de seus produtos em situações de estresse podendo relacionar a sua função de manter o nível redox e de energia celular ³².

Na comparação do grupo que recebeu a vazão de 150L/ha no método ida e volta com o grupo controle foram encontrados 368 compostos. Entre esses metabólitos 253 apresentaram diferença estatisticamente significativa entre as suas intensidades relativas ($p < 0,05$). A análise de *heatmap* que se baseia no agrupamento hierárquico de metabólitos que diferiram significativamente entre os tratamentos indicou o agrupamento dos dois grupos com base nos principais metabólitos (Figura 2a). Treze vias metabólicas foram identificadas que diferenciam os dois grupos através da avaliação de enriquecimento das vias metabólicas com base nos compostos significativamente diferentes.

As mesmas vias afetadas no grupo com o método apenas ida também foram afetadas no método ida e volta (Figura 2b) indicando a mesma situação de resposta metabólica na planta. Nesse método também foi possível observar impacto na via do enxofre que apresenta papel fundamental da síntese da Glutathione (GSH) impactando o controle de expressões gênicas e a desintoxicação de ROS nas células da planta, o aumento de compostos de enxofre são relacionados à condições estressantes uma vez que estes apresentam funções de defesa ³³.

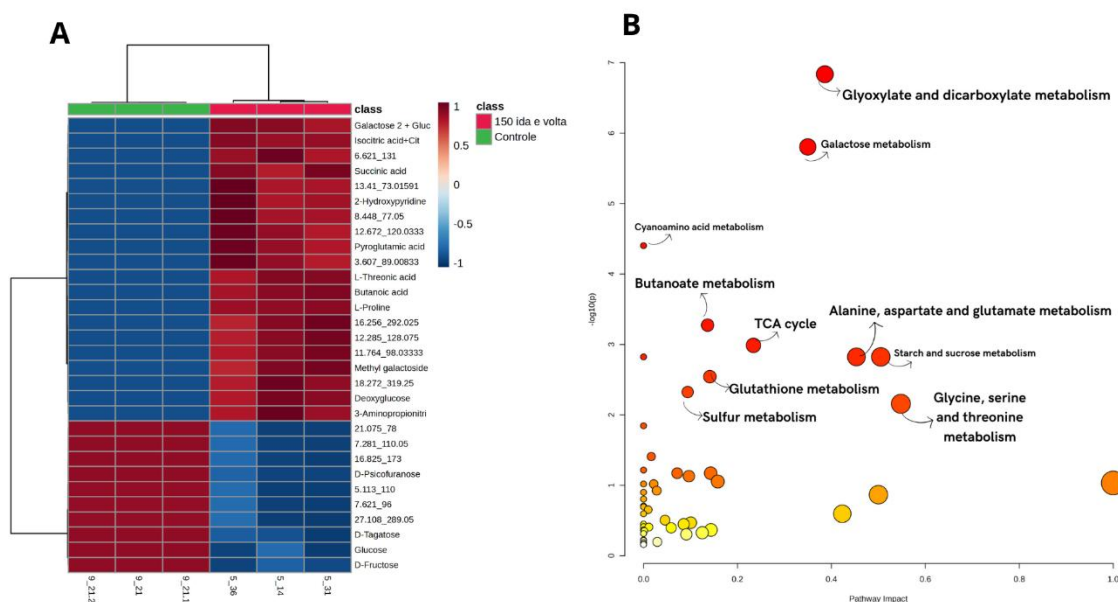


Figura 2. **A)** *Heatmap* dos 30 principais metabólitos com diferença significativa ($p < 0,05$) entre o controle e 150 L/ha no método ida e volta. **B)** Principais vias metabólicas ($p < 0,05$) com impactos dos metabólitos significativos.

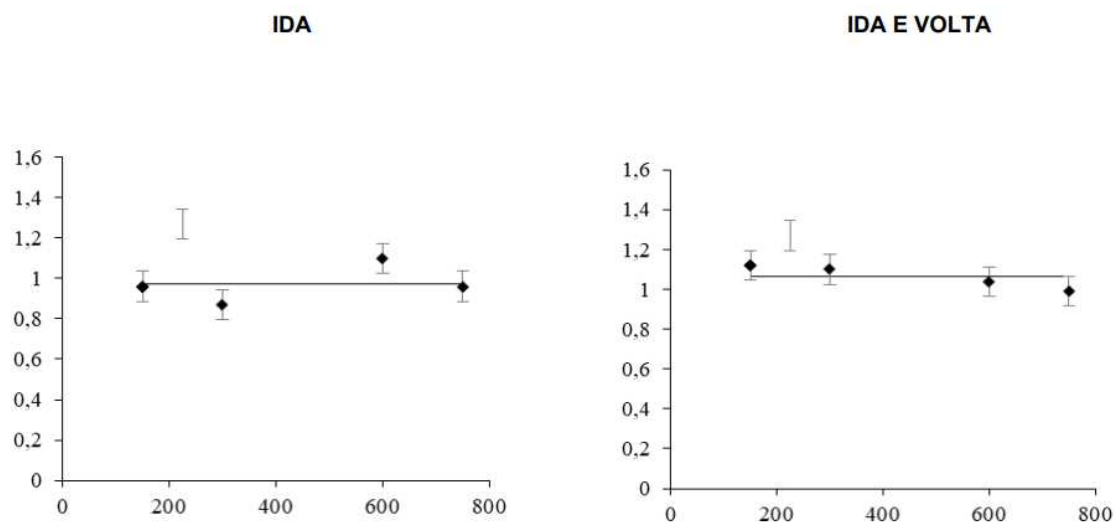
Os aumentos desses compostos nos tratamentos que receberam a aplicação de 150 L/ha nos dois métodos e suas influências nos presentes via metabólicas reforçam a ideia da relação da concentração elevada combinada aos métodos de menores vazões causam efeitos de desequilíbrio na planta.

A análise de incidência de bacteriose após a implementação dos tratamentos revelou que a aplicação do herbicida não resultou em um aumento significativo de bacteriose nas folhas de alho (Gráfico 3), mesmo sendo observadas injúrias nas folhas nos diferentes tratamentos. Esse resultado é relevante ao considerarmos que a incidência severa de bacteriose reduz a área foliar, comprometendo a produtividade e a qualidade dos bulbos^{23,34}.

Além das consequências das injúrias causadas pelos herbicidas, é fundamental considerar a irrigação por aspersão, método adotado neste trabalho, como um possível fator de indução da bacteriose na cultura do alho²³. No entanto, os resultados deste estudo não indicaram influência significativa desses dois fatores na ocorrência de bacterioses. O desenvolvimento de doenças causadas por bactérias também está sujeito a influências ambientais, como faixa de temperatura e a umidade relativa do ar^{34,35}. Durante a condução do estudo, verificou-se que a região apresentou baixa umidade relativa do ar e registrou com pouca ocorrência de chuvas ao longo do período entre março e julho de 2022. Essas condições

climáticas podem ter contribuído para a baixa incidência de bacterioses na cultura do alho. Resultados semelhantes foram obtidos por ³⁶ ao registrar uma ocorrência baixa de queima bacteriana no alho no ano de 2019 relacionada a chuvas mal distribuídas.

Gráfico 3. Incidência de bacteriose nas plantas de alho de acordo com a escala visual da Sociedade Brasileira de Plantas Daninhas nas vazões de 150, 300, 600 e 750 L/há nos tratamentos unidirecional e ida e volta de aplicação de flumioxazina.



A produtividade e classificação comercial dos bulbos de alho não foi influenciada pelo volume de calda e técnica de aplicação (Tabela 3). A distribuição da classificação comercial dos bulbos foi semelhante em todos os tratamentos avaliados.

Tabela 3. Produtividade (t/ha) e classificação de bulbos de alho com aplicações de Flumyzin nas vazões de 150, 300, 600 e 750L/há.

tratamentos		produtividade (t/ha)	classificação comercial (%)			
aplicação	vazão (L/ha)		bulbo 3/4	bulbo 5/6	bulbo 7	bulbos indústria
ida	150	12,47 a	12,97	78,90	1,05	7,08
	300	12,37 a	11,79	74,74	7,22	6,26
	600	12,12 a	15,51	71,91	4,02	8,56
	750	11,85 a	16,08	75,81	2,34	5,77
ida e volta	150	12,01 a	12,25	79,87	1,16	6,71
	300	11,83 a	15,41	76,79	2,03	5,77
	600	11,87 a	15,16	77,13	1,41	6,30
	750	11,24 a	16,92	75,47	2,46	5,15
vontrole	-	12,83 a	15,89	77,08	4,45	2,57

médias seguidas pelas mesmas letras não diferem pelo teste Scott-Knott a 10% de significância.

Resultados semelhantes foram encontrados por ¹⁵, que avaliaram o efeito de diversos herbicidas, incluindo a flumioxazina, nas cultivares Ito e Chonan. Nenhum registro de diferenças na produtividade e no diâmetro dos bulbos foi observado entre os tratamentos para nenhuma das cultivares. Os autores sugerem que esses resultados podem ser atribuídos à capacidade de recuperação das plantas de alho frente à fitotoxicidade, bem como ao controle efetivo das plantas daninhas pelos herbicidas testados, o que reduz a competitividade e favorece a produtividade e a formação de bulbos ¹⁵.

A seletividade de um herbicida está sujeita a uma série de fatores, incluindo a capacidade da cultura em degradar ou metabolizar a molécula do herbicida antes que ela exerça sua ação. Essa capacidade metabólica da cultura permite sua sobrevivência, enquanto a planta daninha, por não possuir essa mesma capacidade, acaba morrendo ²⁴. Esses resultados demonstram a seletividade da cultura do alho a flumioxazina, uma vez que mesmo em concentração maior, aplicada no tratamento de menor volume (150L/ha⁻¹) não houve queda na produtividade. Essas investigações são muito importantes para determinar a seletividade das culturas aos herbicidas do mercado, garantindo que a aplicação não interfira na quantidade e qualidade da produção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores e professores de mestrado pelo valioso apoio e orientação. A minha família, por seu amor incondicional e incentivo contínuo, e a Deus, por me conceder força e sabedoria ao longo desta jornada. Sem vocês, este trabalho não seria possível

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Resende, F. V. Desafios da produção e inovações tecnológicas para cultura do alho no Brasil. *Hortaliças em Revista*. 2018.
- (2) Revista Campo e Negócio. Alho brasileiro sofre concorrência desleal. (<https://anapa.com.br/revista-campo-e-negocio-alho-brasileiro-sofre-concorrancia-desleal/>) (Acesso 2023-08-04).
- (3) Giehl, A. L.; Padrão, G. A.; Elias, H. T.; Alves, J. R.; Gugel, J. T.; Junior, R. G.; Marcondes, T. Boletim Agropecuário. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. 2020.
- (4) Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Série Histórica - Custos - Alho - 2015 a 2022. (<https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/789-alho>) (Acesso 2023-08-04).

- (5) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Produção Agrícola Municipal - PAM. (<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturastemporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>) (Acesso 2023-08-04).
- (6) Baraibar, B.; White, C. M.; Hunter, M. C.; Finney, D. M.; Barbercheck, M. E.; Kaye, J. P.; Curran, W. S.; Bunchek, J.; Mortensen, D. A. Weeds in Cover Crops: Context and Management Considerations. *Agriculture (Switzerland)* **2021**, *11* (3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030193>.
- (7) Shcatula, Y. Chemical protection of soybean crops against weeds. *Sciences of Europe*. **2021**, 27-35.
- (8) Abbas, A. M.; Al-Kahtani, M. A.; Alfaifi, M. Y.; Elbehairi, S. E. I.; Badry, M. O. Floristic Diversity and Phytogeography of JABAL Fayfa: A Subtropical Dry Zone, South-West Saudi Arabia. *Diversity (Basel)* **2020**, *12* (9). <https://doi.org/10.3390/D12090345>.
- (9) DaviddMRichardson, J.; TsungaiiAZengeyaaEditors, J. *Invading Nature Springer Series in Invasion Ecology 14 Biological Invasions in South Africa*. <http://www.springer.com/series/7228>.
- (10) Mamphogoro, T. P.; Babalola, O. O.; Aiyegoro, O. A. Sustainable Management Strategies for Bacterial Wilt of Sweet Peppers (*Capsicum Annuum*) and Other Solanaceous Crops. *Journal of Applied Microbiology*. John Wiley and Sons Inc September 1, 2020, pp 496–508. <https://doi.org/10.1111/jam.14653>.
- (11) Colbach, N.; Colas, F.; Cordeau, S.; Maillot, T.; Queyrel, W.; Villerd, J.; Moreau, D. The FLORSYS Crop-Weed Canopy Model, a Tool to Investigate and Promote Agroecological Weed Management. *Field Crops Res* **2021**, *261*. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>.
- (12) Patil, B. V.; Naruka, I. S.; Shaktawat, R. P. S. Studies on growth, yield and quality of garlic (*Allium sativum* L.) as affected by herbicides and weeds. *International Journal of Bio-resource and Stress Management* (2016): 1099-1103. <http://dx.doi.org/10.23910/IJBSM/2016.7.5.1540a>
- (12) Yousefi, A. R.; Rahimi, M. R. Integration of Soil-Applied Herbicides at the Reduced Rates with Physical Control for Weed Management in Fennel (*Foeniculum Vulgare* Mill.). *Crop Protection* **2014**, *63*, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.05.018>.
- (13) Rahman HU, Khattak AM, Sadiq M, Ullah K, Javaria S, Ullah I. Influence of different weed management practices on yield of garlic crop. *Sarhad J Agric*. **2012**; 28(2):213-8.
- (14) Sahoo S, Patel TU, Baldaniya MJ, Chavan A, Murmu S. Effect of herbicide on crop growth and yield of garlic (*Allium sativum* L.). *Int J Chem Sci*. **2018**;6(3):3248-50.
- (15) Guerra, N.; Haramoto, R.; Schmitt, J.; Costa, G. D.; Schiessel, J. J.; Neto, A. M. O. Weed Control and Selectivity Herbicides Pre Emerging in Garlic Cultivars. *Planta Daninha* **2020**, *38*, 1–8. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582020380100074>.

- (16) Marques, M.; Lucini, M. A.; Carvalho, S. I. C.; Leite, D. L.; Abdo, R. A.; Portela, J. A.; Seno, S. Agricultura e meio-ambiente: um equilíbrio possível? *Nosso alho*. 2009. (https://anapa.com.br/wp-content/uploads/2017/01/Nosso_Alho_N5.pdf) (Acesso 2023-08-04).
- (17) Walperes, K. C.; Reis, M. R. dos; Carneiro, G. D. O. P.; Rocha, B. H.; Dias, R. D. C.; Melo, C. A. D.; Gonçalves, C. G. Residual de Metribuzin No Solo Sobre o Crescimento Do Alho, Cebola e Feijão. *Revista Brasileira de Herbicidas* **2015**, *14* (1), 64. <https://doi.org/10.7824/rbh.v14i1.390>.
- (18) Niekamp, J.W.; Johnson, W.G. Weed management with sulfentrazone and flumioxazin in no-tillage soyabean (Glycine max). *Crop Prot.* **2001**, *20*, 215–220.
- (19) Wilson, D.E.; Nissen, S.J.; Thompson, A. Potato (*Solanum tuberosum*) variety and weed response to sulfentrazone and flumioxazin. *Weed Technol.* **2002**, *16*, 567–574.
- (20) Barker, Abigail L., et al. Discovery, mode of action, resistance mechanisms, and plan of action for sustainable use of Group 14 herbicides. *Weed Science*. **2023**: 1-55.
- (21) Lehnen Jr, L. P.; Sherman, T. D.; Bacerril, J. M.; Duke, S. O. Tissue and cellular localization of acifluorfen-induced porphyrins in cucumber cotyledons. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. **1990**: 239-248. [https://doi.org/10.1016/0048-3575\(90\)90130-T](https://doi.org/10.1016/0048-3575(90)90130-T).
- (22) Dayan, Franck E. Current status and future prospects in herbicide discovery. *Plants*. **2019**: 341. <https://doi.org/10.3390/plants8090341>.
- (23) Marouelli, W. A.; Braga, M. B.; Lucini, M. A.; Resende, F. V. Irrigação na cultura do alho. Circular Técnica. Embrapa. **2014**.
- (24) Roman, E. S.; Vargas, L.; Rizzardi, M. A.; Hall, L.; Beckie, H.; Wolf, T. M. Em *Como funcionam os herbicidas*, edição nº21, Roman, E. S.; Vargas, L., Gráfica Editora Berthier, Passo Fundo, Brasil, 2005. 152p.
- (25) Tripathy, B. C.; Mohapatra, A.; Gupta, I. Impairment of the Photosynthetic Apparatus by Oxidative Stress Induced by Photosensitization Reaction of Protoporphyrin IX. *Biochim Biophys Acta Bioenerg.* **2007**, 860–868. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2007.03.008>.
- (26) Neto, J. C. R., Vieira, L. R., de Aquino Ribeiro, J. A., de Sousa, C. A. F., Júnior, M. T. S., & Abdelnur, P. V. Metabolic effect of drought stress on the leaves of young oil palm (*Elaeis guineensis*) plants using UHPLC–MS and multivariate analysis. *Scientific Reports*. **2021**. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97835-x>.
- (27) Hildebrandt, T. M., Nesi, A. N., Araújo, W. L., & Braun, H. P. Amino acid catabolism in plants. *Molecular plant*. **2015**. *8*(11), 1563-1579. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2015.09.005>.
- (28) Xiong, H., Guo, H., Xie, Y., Zhao, L., Gu, J., Zhao, S., ... & Liu, L. RNAseq analysis reveals pathways and candidate genes associated with salinity tolerance in a spaceflight-induced wheat mutant. *Scientific reports*, **2017**. *7*(1), 2731.

- (29) Seifikalhor, M., Aliniaiefard, S., Hassani, B., Niknam, V., & Lastochkina, O.. Diverse role of γ -aminobutyric acid in dynamic plant cell responses. *Plant cell reports*. **2019**. 38, 847-867.
- (30) Ma, N. L., Rahmat, Z., & Lam, S. S. A review of the “omics” approach to biomarkers of oxidative stress in *Oryza sativa*. *International Journal of Molecular Sciences*, **2013**. 14(4), 7515-7541.
- (31) Igamberdiev, A. U., & Kleczkowski, L. A. The glycerate and phosphorylated pathways of serine synthesis in plants: the branches of plant glycolysis linking carbon and nitrogen metabolism. *Frontiers in Plant Science*. **2018**. 9, 349874.
- (32) Kishor, P. K., Suravajhala, R., Rajasheker, G., Marka, N., Shridhar, K. K., Dhulala, D., ... & Polavarapu, R. Lysine, lysine-rich, serine, and serine-rich proteins: link between metabolism, development, and abiotic stress tolerance and the role of ncRNAs in their regulation. *Frontiers in Plant Science*. **2020**. 11, 546213.
- (33) Capaldi, F. R., Gratão, P. L., Reis, A. R., Lima, L. W., & Azevedo, R. A. Sulfur metabolism and stress defense responses in plants. *Tropical Plant Biology*. **2015** 8, 60-73.
- (34) Marcuzzo, L. L. Queima bacteriana do alho. *Cultivar HP*. 2018.
- (35) Vale, F.X.R.; Zambolim, L. Influência da temperatura e da umidade nas epidemias de doenças de plantas. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*. **1996**. v.4, p.149-207.
- (36) Marcuzzo, L. L.; Catafesta, G. Epidemiologia temporal da queima bacteriana do alho. *Revista agronomia brasileira*. **2021**. v.1, n.14.