UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Isotiocianato de alilo no controle de insetos-praga em milho: efeito da recirculação de ar e da temperatura na mortalidade

Daniel Andrés Castro Cerón
Doctor Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

DANIEL ANDRÉS CASTRO CERÓN

Isotiocianato de alilo no controle de insetos-praga em milho: efeito da recirculação de ar e da temperatura na mortalidade

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Ernandes R. de Alencar

Coorientadora: Leda Rita Dantonino Faroni

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

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

T
C355i
2026

Castro Cerón, Daniel, 1993-
Isotiocianato de alilo no controle de insetos-praga em milho: efeito da recirculação de ar e da temperatura na mortalidade / Daniel Castro Cerón. – Viçosa, MG, 2026.
1 dissertação eletrônica (85 f.): il. (algumas color.).

.
Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2026.
Inclui bibliografia.
DOI: https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.434
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Milho - Doenças e pragas - Controle. 2. Insetos como transmissores de doenças das plantas. 3. Milho - Armazenamento - Doenças e danos - Controle. 4. Inseticidas vegetais. 5. Isotiocianato de alila. I. Alencar, Ernandes Rodrigues de, 1980-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 633.1599517

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

DANIEL ANDRÉS CASTRO CERÓN

Isotiocianato de alilo no controle de insetos-praga em milho: efeito da recirculação de ar e da temperatura na mortalidade

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de março de 2026.

Assentimento:

Daniel Andrés Castro Cerón
Autor

Ernandes Rodrigues de Alencar
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 27/07/2026 às 17:32:46 e pelo orientador em 04/08/2026 às 06:01:32. 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 **TJCW.FO4F.18RI** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus irmãos Kevin, Julian e Giovanna.
A minha avó Ana Chicunque.
Ao meu avô Esteban e meu tio Elver Ceron (in memoriam).

A minha mãe Lida Cerón
A minha noiva Jhennifer Silveira,
e a minha filha Giovanna.
DEDICO!

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força para afrontar os desafios da vida e me acompanhar durante toda minha jornada acadêmica.
Ao meu orientador o professor Ernandes Rodrigues de Alencar pela sua parceria durante todos esses anos, além da sua orientação agradeço imensamente sua compreensão, paciência e amizade.
Á professora Leda Rita D´antonino Faroni quem me abriu as portas do Laboratório de pós-colheita, agradeço pela sua orientação e todos seus ensinamentos.
Ao professor Marcus Vinicius de Assis Silva, agradeço pela sua amizade e exemplo de excelência.
Ao professor Paulo Cecon pela colaboração e aprimoramento na etapa dos analises estatísticos.
A Leonardo Marin e toda minha família pelo apoio brindado durante todos esses anos, aos meus irmãos Kevin, Julian e Giovanna, agradeço pelo seu carinho mesmo na distância e pela compreensão da minha ausência em casa.
À minha mãe, Lida, quero agradecer por todo o seu apoio incondicional na realização deste sonho, por nunca me abandonar e por me ensinar a ser forte diante das adversidades. Palavras jamais poderão expressar todo o amor e gratidão que sinto por você.
À minha noiva Jhennifer por ser minha parceira de vida, agradeço pelo seu amor incondicional, paciência, pela decisão de querer formar um lar comigo, e pela oportunidade de ser o pai de Giovanna.
Ao Zé Geraldo e a Cida, por seu carinho, confiança e por me fazer sentir em casa.
Aos membros do Laboratório de pós-colheita, agradeço por toda a ajuda brindada durante toda a trajetória, igualmente a todo o pessoal da Fabrica de razão da UFV pela sua disposição para me ajudar na condução dos experimentos.
À Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela formação acadêmica de excelência, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.
Finalmente meus agradecimentos aos meus amigos, colegas, aos membros da banca e todos os profissionais que contribuíram direta e indiretamente com a realização e aprimoramento desta pesquisa.
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

CERÓN, Daniel Andrés Castro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2026. **Isotiocianato de alilo no controle de insetos-praga em milho: efeito da recirculação de ar e da temperatura na mortalidade**. Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar. Coorientadora: Leda Rita Dantonino Faroni.

As perdas pós-colheita de milho (Zea mays L.) representam um dos principais desafios para a segurança alimentar e a sustentabilidade da cadeia produtiva no Brasil. Estima-se que entre 30% e 40% dos grãos armazenados sejam comprometidos pela ação de insetos-praga, como Sitophilus zeamais, Rhyzopertha dominica e Tribolium castaneum. Tradicionalmente, o controle desses organismos baseia-se no uso de fumigantes químicos, especialmente a fosfina. No entanto, o uso contínuo desse composto tem favorecido o desenvolvimento de resistência, reduzindo sua eficácia e demandando alternativas que aliem eficiência, segurança e viabilidade operacional. Nesse contexto, o isotiocianato de alilo (AITC), composto natural derivado de plantas da família Brassicaceae, destaca-se como uma alternativa promissora para o manejo de pragas em grãos armazenados. O objetivo desta tese foi avaliar a eficiência da aplicação de AITC em sistemas com recirculação de ar no controle de insetos-praga em milho armazenado, considerando a influência de variáveis críticas, como tempo de exposição, temperatura e posição na coluna de grãos. Para isso, foi desenvolvido um protótipo com capacidade para 60 kg de grãos, no qual diferentes condições experimentais foram avaliadas. A análise dos dados permitiu determinar os pontos críticos da curva de mortalidade : ponto de inflexão crítico inferior (PcI, Lower Critical Point) e ponto crítico superior (PcU, Upper Critical Point), que definem os intervalos de maior sensibilidade do modelo em relação ao tempo de exposição. Os resultados demonstraram que o sistema com recirculação de ar apresentou desempenho significativamente superior ao sistema sem recirculação. No primeiro capítulo, conduzido a 25 °C, a recirculação promoveu mortalidade uniforme ao longo de toda a coluna de grãos. Para S. zeamais, os valores de PcI variaram entre 8 e 10 h, enquanto os de PcU situaram-se entre 16 e 18 h. Para R. dominica, os intervalos foram de 7 a 9 h (PcI) e de 11 a 17 h (PcU). Já T. castaneum apresentou maior tolerância ao tratamento, com PcI entre 12 e 15 h e PcU entre 27 e 30 h. No segundo capítulo, verificou-se que o aumento da temperatura reduziu de forma expressiva os intervalos críticos de mortalidade. Para S. zeamais, por exemplo, os valores passaram de 14,0/35,1 h a 15 °C para 6,3/9,6 h a 35 °C. Esse padrão foi consistente entre as espécies avaliadas, indicando que temperaturas mais elevadas potencializam a ação do AITC e reduzem o

tempo necessário para alcançar níveis elevados de mortalidade. Em contraste, o sistema sem recirculação apresentou limitações significativas, com mortalidade restrita à camada superior da coluna de grãos, independentemente da temperatura. Esses resultados evidenciam que a difusão natural do AITC é insuficiente para promover controle uniforme, destacando a importância da recirculação como mecanismo de distribuição eficiente do composto. Do ponto de vista aplicado, o sistema de recirculação com AITC mostrou-se eficaz e homogêneo, características essenciais para sua utilização em escala comercial. Além disso, a tecnologia pode ser integrada a sistemas de aeração já existentes em unidades armazenadoras, facilitando sua adoção sem a necessidade de grandes investimentos. Sua utilização também pode ser incorporada a estratégias de rotação com fumigantes convencionais, contribuindo para retardar o desenvolvimento de resistência e prolongar a vida útil desses compostos. Em síntese, esta tese demonstra que o uso do AITC associado à recirculação de ar constitui uma alternativa eficiente e promissora para o controle de insetos-praga em milho armazenado. Ao integrar diferentes variáveis operacionais e ambientais, os resultados fornecem bases consistentes para a aplicação prática dessa tecnologia, contribuindo para a redução de perdas pós-colheita e para a sustentabilidade da cadeia produtiva.

Palavras-chave: isotiocianato de Alilo; recirculação; pragas de grãos armazenados; tempo de exposição; temperatura

ABSTRACT

CERÓN, Daniel Andrés Castro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2026. **Allyl isothiocyanate for the control of insect pests in maize: effects of air recirculation and temperature on mortality**. Adviser: Ernandes Rodrigues de Alencar. Co-adviser: Leda Rita Dantonino Faroni.

Postharvest losses of maize (Zea mays L.) represent one of the main challenges to food security and the sustainability of the production chain in Brazil. It is estimated that between 30% and 40% of stored grains are compromised by the action of insect pests, such as Sitophilus zeamais, Rhyzopertha dominica, and Tribolium castaneum. Traditionally, the control of these organisms relies on the use of chemical fumigants, particularly phosphine. However, the continuous use of this compound has promoted the development of resistance, reducing its effectiveness and creating the need for alternatives that combine efficiency, safety, and operational feasibility. In this context, allyl isothiocyanate (AITC), a natural compound derived from plants of the Brassicaceae family, has emerged as a promising alternative for pest management in stored grains. The objective of this thesis was to evaluate the efficiency of AITC application in air recirculation systems for the control of insect pests in stored maize, considering the influence of critical variables such as exposure time, temperature, and position within the grain column. To this end, a prototype with a capacity of 60 kg of grain was developed, in which different experimental conditions were evaluated. Data analysis was performed using sigmoidal regression, allowing the identification of critical points in the mortality curve (PcI - Lower Critical Point and PcU - Upper Critical Point) which define the intervals of greatest sensitivity of the model to variations in exposure time. The results showed that the air recirculation system exhibited significantly superior performance compared to the non-recirculation system. In the first chapter, conducted at 25 °C, recirculation promoted uniform mortality throughout the entire grain column. For S. zeamais, PcI values ranged from 8 to 10 hours, while PcU values ranged from 16 to 18 hours. For R. dominica, the intervals ranged from 7 to 9 hours (PcI) and from 11 to 17 hours (PcU). In contrast, T. castaneum showed greater tolerance to the treatment, with PcI values between 12 and 15 hours and PcU values between 27 and 30 hours. In the second chapter, increasing temperature significantly reduced the critical mortality intervals. For S. zeamais, for example, values decreased from 14.0/35.1 hours at 15 °C to 6.3/9.6 hours at 35 °C. This pattern was consistent across the evaluated species, indicating that higher temperatures enhance the action of AITC and reduce the time required to

achieve high mortality levels. In contrast, the system without recirculation showed significant limitations, with mortality restricted to the upper layer of the grain column, regardless of temperature. These results demonstrate that the natural diffusion of AITC is insufficient to ensure uniform control, highlighting the importance of recirculation as an efficient mechanism for compound distribution. From an applied perspective, the AITC recirculation system proved to be effective and homogeneous, which are essential characteristics for its use at a commercial scale. In addition, the technology can be integrated into existing aeration systems in grain storage facilities, facilitating its adoption without the need for major investments. Its use can also be incorporated into rotation strategies with conventional fumigants, contributing to delaying resistance development and extending the useful life of these compounds. In summary, this thesis demonstrates that the use of AITC associated with air recirculation constitutes an efficient and promising alternative for the control of insect pests in stored maize. By integrating different operational and environmental variables, the results provide a solid basis for the practical application of this technology, contributing to the reduction of postharvest losses and to the sustainability of the production chain.

Keywords: allyl isothiocyanate; recirculation; stored-grain pests; exposure time; temperature

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL....12
REFERÊNCIAS....15
CAPÍTULO 1: EFICIÊNCIA DO ISOTIOCIANATO DE ALILO SOB RECIRCULAÇÃO DE AR NO CONTROLE DE INSETOS-PRAGA EM MILHO: INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E DA POSIÇÃO NA COLUNA DE GRÃOS....18
RESUMO....18
1. INTRODUÇÃO....19
2. MATERIAL E MÉTODOS....20
2.1. Criação de Insetos....20
2.2. Isotiocianato de Alilo (AITC)....20
2.3. Confecção de protótipo do silo para acondicionamento dos grãos....21
2.4. Bioensaios de toxicidade....22
2.5. Taxa instantânea de crescimento populacional (ri)....23
2.6. Qualidade dos grãos de milho expostos a AITC....24
2.7. Análises estatísticas....24
3. RESULTADOS....25
3.1. Bioensaios de toxicidade....25
3.2. Taxa instantânea de crescimento populacional....30
3.3. Qualidade dos grãos de milho expostos a AITC....34
4. DISCUSSÃO....38
5. CONCLUSÕES....39
6. REFERÊNCIAS....41
CAPÍTULO 2: EFEITO DA TEMPERATURA NA DINÂMICA DE MORTALIDADE DE *Sitophilus zeamais* E *Tribolium castaneum* EM MILHO TRATADO COM ISOTIOCIANATO DE ALILO SOB RECIRCULAÇÃO DE AR....48
RESUMO....48
1. INTRODUÇÃO....49
2. MATERIAL E MÉTODOS....51
2.1. Insetos e milho....51
2.2. Isotiocianato de Alilo (AITC)....52
2.3 Bioensaios de toxicidade....52
2.3. Taxa instantânea de crescimento populacional (ri)....53
2.4. Qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC nas diferentes temperaturas....54
2.5. Analises estatísticas....54
3. RESULTADOS....55
3.1. Volatilização do AITC....55
3.2. Bioensaios de Toxicidade....57
3.3. Taxa instantânea de crescimento populacional (r_i)....64
***3.4.* Qualidade física dos grãos expostos ao AITC nas diferentes Temperaturas**....68
4. DISCUSSÃO....75

5. CONCLUSÕES.....78
6. REFERÊNCIAS.....79
CONCLUSÕES GERAIS.....84

INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays L.*) é uma das culturas mais importantes a nível mundial e particularmente no Brasil, desempenhando papel fundamental na alimentação humana e animal, bem como na indústria energética. Em escala global, a produção de milho é estimada em 1,28 - 1,30 bilhão de toneladas (USDA, 2025). No Brasil para a safra 2025/26, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) projeta uma produção total estimada em aproximadamente 353 milhões de toneladas, o que reforça o papel estratégico do milho na matriz produtiva do país. Grande parte deste volume é destinada ao consumo interno, sobretudo para a alimentação animal e para a produção de biocombustíveis, evidenciando sua importância para a economia e para a segurança alimentar do país (CONAB, 2025).

As perdas pós-colheita do milho representam um problema significativo, especialmente em países como o Brasil, onde o armazenamento inadequado associado a infestações por insetos, deterioração microbiológica e danos físicos podem comprometer até 30% da produção anual. Estes danos não apenas reduzem a quantidade de produto comercializável, mas também afetam a qualidade e segurança do grão, limitando seu uso para consumo humano e animal. Fatores como umidade inadequada e temperatura durante o armazenamento aumentam a susceptibilidade a insetos-praga e fungos, afetando a estabilidade do produto e causando perdas econômicas substanciais (OLIVEIRA et al., 2014).

A resistência de insetos-praga aos fumigantes químicos convencionais, especialmente fosfina, representa um desafio crescente na proteção de grãos armazenados (SHAH et al., 2025). A resistência a fosfina desenvolveu-se devido ao uso repetido e a doses subletais de compostos químicos, o que levou a populações de insetos serem mais difíceis de controlar, incrementando a necessidade de novas estratégias de manejo integrado (PIMENTEL et al., 2008). Além disso, alguns fumigantes convencionais apresentam riscos ambientais e à saúde humana, o que tem motivado a busca de alternativas mais seguras e sustentáveis. Neste contexto, compostos naturais como óleos essenciais e seus componentes majoritários estão emergindo como opções promissoras para oferecer controle eficaz com menor impacto ambiental (ISMAN, 2020)

O isotiocianato de alilo (AITC) é um composto orgânico volátil que pertence à família dos isotiocianatos, conhecido por sua forte ação biocida, e seu potencial de aplicação como fumigante natural para a proteção de alimentos armazenados (VANDICKE et al., 2020, VILELA et al., 2021, WU et al., 2015). Proveniente principalmente de plantas do gênero Brassica, como a mostarda e o rabanete, o AITC caracteriza-se por sua alta volatilidade, capacidade de penetrar em espaços pequenos e um espectro amplo de ação contra insetos, bactérias e fungos (VANDICKE et al., 2020). O mecanismo de ação do AITC está relacionado

com a alteração de processos metabólicos essenciais nos organismos, incluindo a inibição de enzimas e a indução de estresse oxidativo (ZHANG et al., 2016).

Além disso, o AITC demonstrou ser uma alternativa promissora frente aos fumigantes químicos convencionais devido ao seu perfil mais seguro para o meio ambiente e a saúde humana, conforme certificado pela European Food Safety Authority (SHAH et al., 2025). O AITC tem sido amplamente investigado como agente fumigante e conservante natural em diversas matrizes alimentares, demonstrando eficácia significativa no controle de pragas e microrganismos deteriorantes. Em grãos armazenados, estudos recentes comprovaram a toxicidade do AITC contra pragas principais (VANDICKE et al., 2020; VILELA et al., 2021; SHAH et al., 2025).

Vilela et al. (2021) demonstraram que concentrações subletais de AITC (2,0 μL/L) reduziram significativamente a reprodução de *Callosobruchus maculatus* e o grau de infestação em feijão-caupi após 60 dias de armazenamento, contribuindo para a preservação das propriedades físicas dos grãos. Mais recentemente, Saini et al. (2025) desenvolveram tiras de celulose impregnadas com AITC aplicadas em embalagens de polietileno de baixa densidade para o controle de *Callosobruchus chinensis* e *Rhyzopertha dominica* em grão-de-bico, mantendo os parâmetros de qualidade dos grãos, incluindo teor proteico, cor e tempo de cozimento.

Na conservação pós-colheita de frutas e hortaliças, o AITC tem sido investigado principalmente por sua atividade antifúngica e propriedades antimicrobianas. Wu et al. (2015) desenvolveram microcápsulas de AITC que auxiliaram na preservação de tomates verdes maduros e no controle de fungos patogênicos durante o armazenamento, resolvendo problemas relacionados à alta volatilidade e pungência do composto através da liberação controlada do ingrediente ativo.

A incorporação de AITC em sistemas de embalagens ativas também tem demonstrado resultados promissores em outros produtos alimentícios. Bahmid et al. (2021) desenvolveram filmes de acetato de celulose ativados por umidade, contendo sementes de mostarda finamente moídas que, quando aplicados em carne bovina moída, estenderam a vida útil da carne. Zhang et al. (2025), em uma revisão abrangente sobre embalagens inteligentes e antibacterianas para carne, destacaram que a tecnologia de embalagens ativas com AITC apresenta vantagens sobre a atmosfera modificada convencional, oferecendo uma alternativa economicamente viável com liberação sustentada do composto antimicrobiano.

A segurança do uso de AITC na indústria de alimentos tem sido respaldada por estudos toxicológicos abrangentes conduzidos por agências regulatórias internacionais. A Autoridade

Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) estabeleceu uma ingestão diária aceitável (IDA) de 0,02 mg/kg de peso corporal/dia para o AITC com base em estudos de longo prazo em roedores, aplicando um fator de incerteza de 500 para cobrir a extrapolação a partir de uma dose de menor efeito adverso observado (LOAEL) de 9 mg kg^{-1} de peso corporal/dia (EFSA, 2010). Além disso, o AITC é reconhecido como substância 'Geralmente Reconhecida como Segura' (GRAS) pela FDA dos Estados Unidos.

Estudos recentes de dissipação de resíduos demonstraram que o AITC possui baixa persistência em produtos armazenados, com aproximadamente 100% dos resíduos dissipados após 32-36 h de fumigação em grãos de feijão-caupi, sem resíduos detectáveis acima do limite de detecção do método (0,11 μg/kg), comprovando seu uso seguro como bioinseticida (VILELA et al., 2020).

A rápida degradação do AITC em condições ambientais resulta principalmente em produtos como alilamina, dissulfeto de carbono e tiocianato, que são rapidamente biodegradados no ambiente, minimizando a exposição humana e animal após aplicação (PESTICIDE RESEARCH INSTITUTE, 2014). Alibrahem et al. (2025) destacaram em um estudo de revisão que, apesar dos desafios relacionados à volatilidade e otimização de doses, o AITC representa uma alternativa natural promissora aos conservantes sintéticos, oferecendo amplo espectro antimicrobiano com perfil de segurança favorável para aplicação na indústria alimentícia sustentável.

REFERÊNCIAS

ALIBRAHEM, W.; NGUYEN, D. H. H.; KHARRAT HELU, N.; TÓTH, F.; NAGY, P. T.; POSTA, J.; PROKISCH, J.; OLÁH, C. Health Benefits, Applications, and Analytical Methods of Freshly Produced Allyl Isothiocyanate. **Foods**, Basel, v. 14, n. 4, p. 579, 2025. Disponível em: **https://doi.org/10.3390/foods14040579**.

BAHMID, N. A.; YUSOF, Y. A.; ABDULLAH, N.; ABDULLAH, A.; ABDULLAH, S.; ABDULLAH, M. Development of a moisture-activated antimicrobial film containing ground mustard seeds and its application on meat products. **Food Packaging and Shelf** Life, v. 30, p. 100751, 2021. Disponível em https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100753.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Safra de grãos 2025/26: quarto levantamento. Brasília**: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos Acesso em: 19 jan. 2026.

EFSA (EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY). **Scientific Opinion on the safety of allyl isothiocyanate for the proposed uses as a food additive**. EFSA Journal, v. 8, n. 12, p. 1943, 2010.

FDA (U.S. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION). **GRAS Notices - GRN No. 180: Allyl isothiocyanate. 2025**. Disponível em: https://hfpappexternal.fda.gov/scripts/fdcc/index.cfm?set=grasnotices&id=180.

ISMAN, M. B. Plant essential oils for pest and disease management. **Crop Protection**, v. 125, art. 104939, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00079-X

PESTICIDE RESEARCH INSTITUTE. **Technical Evaluation Report: Allyl Isothiocyanate – Crops**. Compiled for the USDA National Organic Program. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Oct. 3, 2014. 25 p. Disponível em: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Allyl%20Isothiocyanate%20TR.pdf.

PIMENTEL, M. A. G.; FARONI, L. R. D.; BATISTA, M. D.; SILVA, F. H. Resistance of stored-product insects to phosphine. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 43, pp. 1671–1676, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200005.

SHAH, S.; JAGADEESAN, R.; NAYAK, M. K. Fumigant toxicity of allyl isothiocyanate against phosphine-resistant populations of five major stored-grain insect pests. **European Journal of Entomology**, vol. 122, pp. 35–41, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.14411/EJE.2025.004:

SAINI, M. K.; ALAM, M. S.; SIDHU, A.; BHATIA, S. Effective and biosafe application of AITC-infused on cellulose strips as a fumigant for managing quality and major insect pests in stored chickpea grains. **Journal of Stored Products Research**, v. 111, p. 102545, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102545

OLIVEIRA, C. M.; AUAD, A. M.; MENDES, S. M.; FRIZZAS, M. R. Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. **Crop Protection**, vol. 56, pp. 50–54, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.022.

USDA. United States Department of Agriculture. **World Agricultural Supply and Demand Estimates (WASDE)**, August 2025. Washington: USDA, 2025. Disponível em: https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/wasde0825.pdf.

VANDICKE, J.; DE VISSCHERE, K.; DECONINCK, S.; LEENKNECHT, D.; VERMEIR, P.; AUDENAERT, K.; HAESAERT, G. Uncovering the biofumigant capacity of allyl isothiocyanate from several Brassicaceae crops against Fusarium pathogens in maize. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 15, p. 5476-5486, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1002/jsfa.10599

VILELA, A. O.; FARONI, L. R. D'A.; GOMES, J. L.; SOUSA, A. H.; CECON, P. R.
Allyl isothiocyanate as a fumigant in the cowpea and its effect on the physical properties of the grain. **Revista Ciência Agronômica,** v. 52, n. 3, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210064.

VILELA, A. O.; FARONI, L. R. D.; RODRIGUES, A. A. Z.; HELENO, F. F.; QUEIROZ, M. E. L. R.; MOURA, E. S.; GOMES, J. L. Headspace Solid-Phase Microextraction: Validation of the Method and Determination of Allyl Isothiocyanate Persistence in Cowpea Beans. **ACS**

Omega, v. 5, n. 34, p. 21364-21373, 2020. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c01385.

WU, H.; XUE, N.; HOU, C. L.; FENG, J. T.; ZHANG, X. Microcapsule preparation of allyl isothiocyanate and its application on mature green tomato preservation**. Food Chemistry**, v. 175, p. 344-349, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.149

ZHANG, J.; ZHANG, J.; ZHANG, L.; QIN, Z.; WANG, T. Review of Recent Advances in Intelligent and Antibacterial Packaging for Meat Quality and Safety. **Foods**, v. 14, n. 7, p. 1157, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/foods14071157

ZHANG, C.; MA, Z.; ZHANG, X.; WU, H. Transcriptomic alterations in *Sitophilus zeamais* in response to allyl isothiocyanate fumigation. **YPEST**, pp. 1–9, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2016.10.001.

CAPÍTULO 1: EFICIÊNCIA DO ISOTIOCIANATO DE ALILO SOB RECIRCULAÇÃO DE AR NO CONTROLE DE INSETOS-PRAGA EM MILHO: INFLUÊNCIA DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO E DA POSIÇÃO NA COLUNA DE GRÃOS

RESUMO

O controle de insetos-praga em grãos armazenados é essencial para reduzir perdas econômicas e garantir a segurança alimentar. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia do isotiocianato de alilo (AITC) como fumigante natural no manejo de *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* e *Tribolium castaneum* em milho armazenado, com ênfase na dinâmica de mortalidade, na determinação dos pontos críticos de exposição — ponto crítico inferior (PcI) e ponto crítico superior (PcU) — e na influência da posição na coluna de grãos sobre a eficiência do tratamento, além da avaliação da qualidade dos grãos. Os experimentos foram conduzidos em um protótipo de PVC com capacidade para 60 kg de grãos, utilizando sistemas com recirculação de ar (CR; 0,46 $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$) e sem recirculação (SR). O AITC foi aplicado na dose de 49,0 $\mu L\ kg^{-1}$, sendo a mortalidade avaliada em três posições na coluna de grãos (base, meio e topo). No sistema com recirculação (CR), observou-se mortalidade uniforme para todas as espécies ao longo da coluna de grãos. Os valores de PcI variaram de 8,10 h (*S. zeamais*) a 15,51 h (*T. castaneum*), enquanto os de PcU variaram de 16,85 h (*S. zeamais*) a 30,56 h (*T. castaneum*), indicando controle eficaz em até 48 h de exposição. *T. castaneum* apresentou maior tolerância ao tratamento, com intervalos críticos mais amplos. Em contraste, no sistema sem recirculação (SR), a mortalidade foi observada apenas na região superior da coluna de grãos, evidenciando a limitação da difusão do AITC ao longo da massa de grãos na ausência de recirculação. A recirculação de ar promoveu maior dispersão do AITC, resultando em controle rápido e homogêneo das pragas ao longo de toda a coluna de grãos, sem alterações nos parâmetros de qualidade avaliados. Esses resultados demonstram que o uso de AITC associado à recirculação constitui uma estratégia eficiente e promissora para o manejo de insetos-praga em grãos armazenados, com potencial de aplicação em sistemas comerciais.

Palavras-chave: Óleo essencial de mostarda; Isotiocianato de alilo; controle de pragas em grãos armazenados; Tempo de exposição.

1. INTRODUÇÃO

O controle e manejo integrado de pragas é essencial para a conservação de grãos e alimentos. Atualmente, o controle químico predomina no manejo de insetos-praga de grãos armazenados, destacando-se o uso de fumigantes como fosfeto de alumínio e fosfeto de magnésio, que liberam fosfina (PH_3) ao entrar em contato com o ar atmosférico (MASUPHA, THAI E SEBITIA, 2024; PIMENTEL et al., 2008). A fosfina substituiu o brometo de metilo, que foi banido pelo Protocolo de Montreal por ser depletor da camada de ozônio (UNEP, 1995), aumentando a dependência a esse fumigante nos últimos anos (AGRAFIOTI et al., 2020; ALZAHRANI E EBERT, 2023).

Entretanto, o uso inadequado e intensivo da fosfina tem levado ao aumento da resistência de insetos-praga como *Tribolium castaneum*, *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* e *Oryzaephilus surinamensis* (LORINI et al., 2005; PIMENTEL et al., 2008; PIMENTEL et al., 2009, FREITAS et al. 2016; GAUTAM et al., 2020; NAYAK et al., 2021). Diversas alternativas têm sido estudadas para minimizar o uso de fosfina, entre elas, os efeitos inseticida e repelente de óleos essenciais e seus compostos. O isotiocianato de alilo (AITC), principal composto do óleo essencial de mostarda, possui atividade biológica documentada contra fungos, insetos, bactérias e nematoides (ISSHIKI et al., 1992; COSTA et al., 2002; MANYES et al., 2015; FREITAS et al., 2016; QUILES et al., 2019).

A eficácia do AITC como inseticida em grãos armazenados, no controle de *Tribolium castaneum*, *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* e *Callosobruchus maculatus*, também foi documentada (SANTOS et al., 2011; DE SOUZA et al., 2018; VILELA et al., 2021; CERÓN et al., 2023). Além disso, estudos indicam que o AITC não altera a qualidade dos grãos tratados (SANTOS et al., 2010). Um desafio para o uso de óleos essenciais em grãos é o baixo coeficiente de difusão de seus compostos. A recirculação tem sido considerada uma estratégia eficaz para melhorar a distribuição de fumigantes (NOYES et al., 1999; AGRAFIOTI et al., 2020). Apenas um estudo investigou o efeito do AITC em sistemas com e sem recirculação sobre *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica*, determinando as doses letais necessárias para 95% de mortalidade em diferentes alturas na coluna de grãos por 48 h (CERÓN et al., 2023). No entanto, a influência de diferentes tempos de exposição — uma variável operacional importante para otimizar a eficácia do controle de pragas e minimizar potenciais impactos na qualidade do grão — ainda não havia sido investigada de forma sistemática. Apesar de seu potencial, o coeficiente de difusão do AITC é relativamente baixo ($7{,}2 \times 10^{-3}$ cm² s⁻¹), em comparação ao da fosfina (0,15 cm² s⁻¹) e do dióxido de carbono (da ordem de 10^{-2} cm² s⁻¹) (SHUNMUGAM et al., 2005; PRATES et al., 2019). Essa característica limita a dispersão

natural do composto na massa de grãos, tornando necessário adotar estratégias complementares, como a recirculação assistida por aeração, para aumentar sua eficácia.

Neste contexto, o presente estudo avançou nessa linha de investigação ao focar no tempo de exposição como um fator crítico. Especificamente, avaliamos a mortalidade de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* sob diferentes tempos de exposição, comparando sistemas com e sem recirculação. Em paralelo, monitoramos a volatilidade do AITC ao longo do tempo e avaliamos se esses ajustes operacionais afetaram variáveis-chave da qualidade do grão. Essa abordagem proporcionou uma compreensão mais profunda da interação entre a dinâmica de distribuição do fumigante e o tempo de exposição, apoiando o desenvolvimento de alternativas mais eficazes, sustentáveis e seguras quanto a resíduos em comparação à fumigação química convencional na gestão de grãos armazenados.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Criação de Insetos

As espécies utilizadas foram selecionadas a partir da coleção de populações de insetos-praga mantidas no Laboratório de Manejo Integrado de Pragas da Área de Pós-Colheita, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Foram escolhidas duas pragas primárias do milho, *Sitophilus zeamais* e *Rhyzopertha dominica*, e uma praga secundária *Tribolium castaneum*. Os insetos foram criados em frascos de vidro de 1 litro contendo grãos de milho com 13% de teor de água (b.u.) para *S. zeamais e T. castaneum*, e grãos de trigo com 13% de teor de água (b.u.) para *R. dominica*. As condições de criação foram mantidas a 27 ± 2 °C e 65 ± 5% de umidade relativa para *S. zeamais*, e a 30 ± 2 °C e 65 ± 5% de umidade relativa para *T. castaneum* e *R. dominica.*

Para a obtenção de insetos adultos de cada espécie, 200 insetos foram colocados em cada frasco de criação. Após 5 dias os adultos foram retirados dos frascos. Conhecendo a data de retirada e o ciclo biológico de cada espécie, obtiveram-se adultos novos cada 40-45 dias por lote para utilizar nos testes de toxicidade, sendo acondicionados previamente às temperaturas correspondente de cada teste.

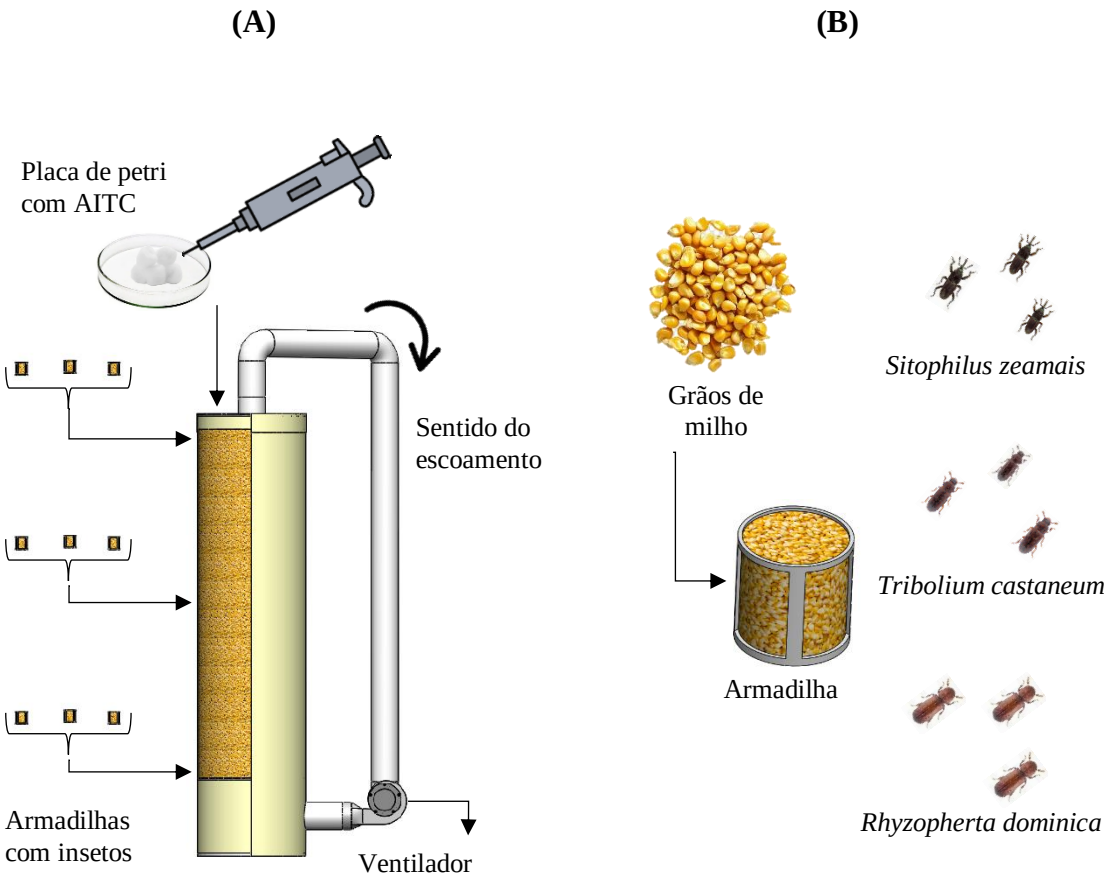
2.2. Isotiocianato de Alilo (AITC)

O isotiocianato de alilo (AITC), com pureza de 95% e densidade de 1,013 g mL^{-1} a 25 °C, foi adquirido da empresa Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, EUA). O produto foi armazenado a 5 °C, em frascos âmbar, protegido da luz e mantido sob refrigeração até o momento de uso, seguindo as recomendações do fabricante para preservar sua estabilidade e atividade fumigante.

2.3. Confecção de protótipo do silo para acondicionamento dos grãos

Os bioensaios foram realizados em um protótipo de PVC (30 cm de diâmetro e 170 cm de altura) com um ventilador centrífugo para movimentação do ar, com conexão de dutos para recirculação, conforme descrito por Ceron et al. (2023).

Figura 1: Configuração experimental para avaliar o efeito do isotiocianato de alilo (AITC) sobre insetos-praga em milho armazenado. (A) Representação esquemática do sistema de fumigação, mostrando a placa de Petri contendo AITC, a direção do fluxo de ar, a coluna de grãos, as armadilhas para insetos posicionadas em diferentes alturas e o ventilador para recirculação. (B) Espécies de insetos e configuração das armadilhas utilizadas nos ensaios: *S. zeamais*, *T. castaneum* e *R. dominica*.



2.4.Bioensaios de toxicidade

A concentração de AITC foi fixada em 49,13 μL kg^{-1}. Essa concentração foi determinada previamente como a CL_{95} para *T. castaneum* no sistema com recirculação por Ceron et al. (2023). Os bioensaios foram conduzidos a uma temperatura de 25 ± 2°C, adotando-se diferentes períodos de exposição, em dois sistemas de aplicação: com recirculação de ar (CR) e sem recirculação de ar (SR). No sistema CR, foi estabelecida vazão volumétrica de 27 L min^{-1}, equivalente a vazão específica de 0,46 m^3 min^{-1} t^{-1}, com recirculação do AITC no sentido anti-horário.

Em cada teste, foram utilizados 60 kg de grãos de milho, e 9 gaiolas cilíndricas (50 cm^3) por espécie, confeccionadas com armação em PVC e revestidas com organza, as quais foram distribuídas em três alturas na coluna de grãos: base (0,0 m), 0,5 m e topo (1,0 m). Cada gaiola continha 20 g de grãos e 20 insetos de três a quatro semanas de adultos.

Para realizar aplicação do AITC, utilizaram-se placas de Petri de vidro de 54 mm de diâmetro revestidas com algodão, conforme descrito por Moura et al. (2019). Posteriormente, a placa Petri com o composto foi colocada no topo da massa de grãos. Em seguida, o protótipo foi vedado com massa de calafetar e, no caso do sistema com recirculação, o ventilador foi acionado. A massa (g) do AITC referente a cada teste foi determinada em balança analítica antes e depois de cada período de exposição. Dessa forma, foi possível estimar o percentual do AITC (m/m) volatizado.

Para o controle da mortalidade de cada espécie foram realizados testes de recirculação de ar sem nenhum tratamento, para cada período de exposição. Após o período de exposição máximo de 48h, nos sistemas com recirculação de ar e sem recirculação, contabilizou-se o número de insetos mortos, para realizar a correção mortalidade, conforme a equação de Abbott (1925) (Equação 1).

$$MC(\%) = \frac{\%Mo - \%\,Mc}{100 - \%Mc} \qquad \text{Equação (1)}$$

Em que:

MC = Mortalidade corrigida

Mo = Mortalidade observada

Mc = Mortalidade no tratamento controle

$$f(x) = \frac{a}{1+e^{\left(\frac{-(x-x_0)}{b}\right)}}$$ Equação (2)

Em que:

f(x) = % Mortalidade.

α = Mortalidade máxima teórica.

x_0 = Valor de X em que F(x) alcança a Metade do valor máximo em α.

b = Inclinação.

x = Tempo de exposição.

Os dados da mortalidade corrigida foram submetidos a análise de regressão não linear de três parâmetros (Equação 2), e foram estimados os pontos de inflexão da curva sigmoide de mortalidade, denominados ponto crítico inferior e ponto crítico superior ou PcI -PcU, pelas suas siglas em inglês respectivamente (PcI - Lower Critical Point e PcU - Upper Critical Point), calculados como:

$$Pcl = x_0 - 2b$$ Equação (3)

$$Pcu = x_0 + 2b$$ Equação (4)

Essas equações (3 e 4) delimitam as regiões de aceleração e desaceleração da mortalidade. De acordo com Caglar et al. (2018), esses pontos representam os extremos onde a segunda derivada da função logística, é nula, identificando a transição de concavidade na curva sigmoidal e maximizando a sensibilidade do modelo a variações no tempo de exposição. Biologicamente, no bioensaio o PcI marca o início da fase exponencial de mortalidade acelerada (inibição metabólica intensa), enquanto o PcU indica o platô próximo à mortalidade máxima (a), permitindo comparações precisas de eficácia entre sistemas de recirculação e posições na coluna de grãos.

2.5. Taxa instantânea de crescimento populacional (ri)

Para avaliar o efeito dos tempos de exposição ao AITC no padrão reprodutivo dos insetos, foi determinada a taxa de crescimento populacional. Os grãos e os insetos de cada gaiola após os tratamentos foram acondicionados separadamente em potes de plástico de 14 cm de diâmetro e armazenados em câmara climática, adotando-se a temperatura e umidade relativas adequadas para o desenvolvimento apropriado de cada espécie. Após o período de 55 dias de

armazenamento, os insetos foram novamente contabilizados e a taxa instantânea de crescimento populacional foi determinada, utilizando-se a equação de Walthall e Stark (1997) (Equação 5).

$$ri = \frac{[Ln\left(\frac{N_f}{N_0}\right)]}{\Delta T} \qquad \text{Equação (5)}$$

Em que:

ri = Taxa de crescimento populacional

N_0 = Número inicial de insetos

N_f = Número final de insetos

ΔT = Tempo de armazenamento

2.6.Qualidade dos grãos de milho expostos a AITC

Para avaliar o efeito do AITC sobre a qualidade dos grãos de milho, utilizou-se milho grão com teor de água em torno de 11-12% em base úmida. Amostras de 300 g de grãos foram acondicionadas em sacos de tecido do tipo organza. Essas amostras foram dispostas nas três alturas da coluna de grãos dentro do protótipo. Após a exposição ao composto em cada teste, foi determinado o teor de água, a coloração e a condutividade elétrica dos grãos.

O teor de água foi determinado, utilizando-se o método padrão de estufa, à 105±1 ºC, por 72 h, conforme ASABE (2013). A condutividade elétrica foi avaliada seguindo metodologia proposta por Vieira et al. (2001). Para isso, amostras de 50 grãos foram pesadas e acondicionadas em recipientes de plástico com 75 mL de água destilada. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em câmara climática BOD a 25 ºC, por 24 h. Depois foi efetuada a leitura da condutividade elétrica da solução em condutivímetro modelo MCA-150. Os resultados de condutividade elétrica foram expressos em $\mu S\ cm^{-1}\ g^{-1}$.

Na avaliação da coloração dos grãos, foi utilizado o colorímetro Minolta modelo CR410. Inicialmente foram obtidas as coordenadas no Sistema de Hunter L*, a* e b*. Em seguida, a partir das coordenadas a* e b*, foram calculadas a saturação de cor (C*) (Equação 6) e tonalidade de cor (h*) (Equação 7) (Maskan, 2001).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \qquad \text{Equação (6)}$$

$$h^* = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \qquad \text{Equação (7)}$$

2.7. Análises estatísticas

A mortalidade dos insetos foi analisada usando um modelo de regressão não linear sigmoidal, ajustado pela função de três parâmetros descrita na Equação (2) usando o software Sigma Plot v.15 (Systat Software Inc).

Os pontos de inflexão, definidos como o ponto de inflexão crítico inferior PcI e o ponto crítico superior ou PcU, foram calculados de acordo com as Equações (3) e (4). PcI e PcU representam as zonas de aceleração e desaceleração na curva de mortalidade, respectivamente. A significância dos parâmetros ajustados foi verificada e os modelos foram avaliados quanto à sua adequação aos dados experimentais.

Os dados relacionados à volatilização do AITC e à taxa instantânea de crescimento populacional (ri) foram submetidos à análise de regressão. Os dados relacionados ao teor de água, condutividade elétrica e cor dos grãos foram submetidos à análise de variância com probabilidade de 5%, utilizando o software Stat Plus v.5 (AnalystSoft Inc, Canadá). Para obter as equações e os gráficos, foi utilizado o software Sigma Plot v.15 (Systat Software Inc).

3. RESULTADOS

3.1.Bioensaios de toxicidade

No sistema com recirculação, equações e curvas de regressão não linear ajustadas foram obtidas para as três alturas na coluna de grãos de cada espécie. Por outro lado, no sistema sem recirculação, a regressão não linear foi realizada para cada espécie apenas a uma altura de 1,0 m da coluna de grãos, visto que a mortalidade dos insetos foi observada somente nessa altura (Tabela 2 e figuras 2 e 3).

No sistema com recirculação, observou-se um bom ajuste nas três alturas (0,0 m, 0,5 m e 1,0 m) para as três espécies estudadas: *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum*, com coeficientes de determinação R^2 superiores a 0,95. Para *S. zeamais*, os pontos críticos inferiores (PcI) variaram entre 8,10 h na altura da base (0,0 m) e 9,64 h na altura intermediária (0,5 m), aumentando para 9,76 h no topo da coluna (1,0 m) no sistema com recirculação (CR). Os pontos críticos superiores (PcU) apresentaram variação similar, com valores de 16,85 h na base (0,0 m), 17,21 h na altura intermediária (0,5 m) e 18,80 h no topo (1,0 m). No sistema sem recirculação (SR), o PcI foi significativamente menor, com um valor de 7,84 h, enquanto o PcU foi de 11,69 h na altura superior (1,0 m). Essa faixa de exposição mais estreita no sistema SR reflete o fato de que o composto permaneceu concentrado nessa altura, sem ser distribuído uniformemente por todo o protótipo, resultando em uma exposição mais rápida, porém localizada.

Para *R. dominica*, os valores de PcI no sistema CR variaram de 8,61 h na base (0,0 m) a 10,43 h no topo (1,0 m), enquanto os valores de PcU variaram de 15,21 h na base (0,0 m) a 17,43 h no topo (1,0 m). No sistema SR, o PcI foi de 6,88 h e o PcU foi de 13,10 h no topo (1,0

m). Novamente, essa faixa de exposição reduzida no sistema SR ocorreu porque o AITC não foi distribuído por toda a coluna de grãos, concentrando-se principalmente no topo.

Por outro lado, *T. castaneum* apresentou os maiores valores de PcI e PcU, destacando sua maior tolerância ao AITC. No sistema CR, o Pc variou de 12,05 h na base (0,0 m) a 15,51 h no topo (1,0 m), enquanto o PcU oscilou entre 27,11 h na base (0,0 m) e 30,56 h no topo (1,0 m). No sistema SR, com um ajuste de precisão menor de $R^2 = 0,87$, o PcI foi de 4,53 h e o PcU foi de 24,88 h na altura do topo (1,0 m) (Tabela 2)

A volatilização do AITC também foi avaliada nos sistemas com recirculação (CR) e sem recirculação (SR), ao longo de períodos de exposição de até 48 h (Tabela 1). Observou-se maior intensidade de volatilização no sistema com recirculação. Com base na equação ajustada para esse sistema, estima-se que a volatilização completa do AITC ocorra em aproximadamente 28,9 h de exposição. Por sua vez, no sistema sem recirculação, esse mesmo tempo de exposição corresponde a uma volatilização de cerca de 23,5% do AITC.

Tabela 1. Equações de regressão de volatilização do AITC (%) em função do tempo, em sistema sem (SR) e com (CR) recirculação.

Sistema	Equações de regressão	R^2	EPE
CR	$\hat{y} = 4.2350 + 0.6683\hat{}X$	0.988	3.478
SR	$\hat{y} = 10.9554 + 3.0787\hat{}X$	0.952	1.855

EPE – Erro padrão da estimativa.

Tabela 2: Parâmetros da regressão sigmoidal ajustada para mortalidade das três espécies de insetos-praga do milho armazenado em diferentes alturas da coluna de grãos, em sistemas de fumigação com (CR) e sem recirculação (SR) de AITC.

Espécie	Sistema	Altura (m)	Equações de regressão ajustadas	R^2	EPE	PcI	PcU
S. zeamais	CR	0,0	$\hat{y} = \frac{97{,}4409}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-12{,}4727)}{2{,}1880}\right)})}$	0,98	6,8150	8,0967	16,8480
		0,5	$\hat{y} = \frac{98{,}1726}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-13{,}6378)}{1{,}7847}\right)})}$	0,97	7,4924	10,0684	17,2072
		1,0	$\hat{y} = \frac{97{,}3175}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-14{,}2202)}{2{,}2905}\right)})}$	0,98	6,5087	9,6392	18,8012
	SR	1,0	$\hat{y} = \frac{99{,}3892}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-9{,}7649)}{0{,}9610}\right)})}$	0,97	7,6556	7,8429	11,6869
R. dominica	CR	0,0	$\hat{y} = \frac{97{,}0862}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-11{,}9113)}{1{,}6482}\right)})}$	0,98	5,9773	8,6149	15,2077
		0,5	$\hat{y} = \frac{98{,}5437}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-13{,}6963)}{2{,}0408}\right)})}$	0,98	5,6529	9,6147	17,7779
		1,0	$\hat{y} = \frac{97{,}0302}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-13{,}9317)}{1{,}7499}\right)})}$	0,99	4,6126	10,4319	17,4315
	SR	1,0	$\hat{y} = \frac{99{,}3905}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-9{,}9893)}{1{,}5554}\right)})}$	0,95	8,9880	6,8785	13,1001

CR: Sistema Com Recirculação; SR: Sistema Sem Recirculação; EPE: Erro padrão da estimativa; PcI e PcU: crítico inferior e ponto crítico superior, respectivamente.

Tabela 2: Parâmetros da regressão sigmoidal ajustada para mortalidade das três espécies de insetos-praga do milho armazenado em diferentes alturas da coluna de grãos, em sistemas de fumigação com (CR) e sem recirculação (SR) de AITC (Continuação)

Espécie	Sistema	Altura (m)	Equações de regressão ajustadas	R^2	EPE	PcI	PcU
T. castaneum	CR	0,0	$\hat{y} = \frac{103{,}1564}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-19{,}5769)}{3{,}7653}\right)})}$	0,97	6,9842	12,0463	27,1075
		0,5	$\hat{y} = \frac{103{,}1564}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-19{,}5769)}{3{,}7653}\right)})}$	0,97	6,9842	12,0463	27,1075
		1,0	$\hat{y} = \frac{105{,}1028}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-23{,}0383)}{3{,}7629}\right)})}$	0,96	8,5970	15,5125	30,5641
	SR	1,0	$\hat{y} = \frac{95{,}9053}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-14{,}7067)}{5{,}0880}\right)})}$	0,87	13,0452	4,5307	24,8827

CR: Sistema Com Recirculação; SR: Sistema Sem Recirculação; EPE: Erro padrão da estimativa; PcI e PcU: crítico inferior e ponto crítico superior, respectivamente

Figura 2: Mortalidade de *S. zeamais* (A), *R. dominica* (B) e *T. castaneum* (C) em função do tempo de exposição ao AITC (49 μL kg^{-1}) no sistema com recirculação (CR), em três alturas da coluna de grãos.

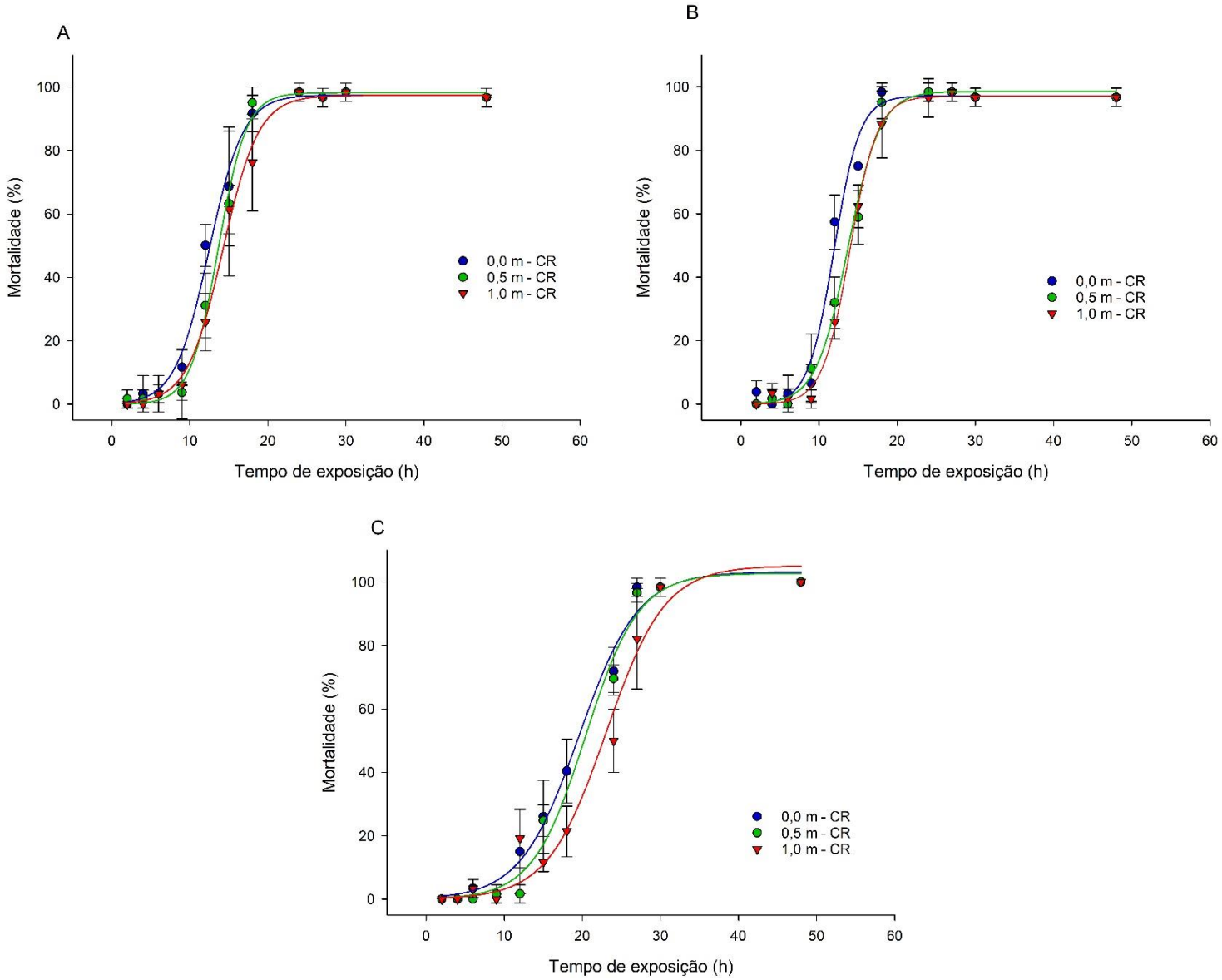
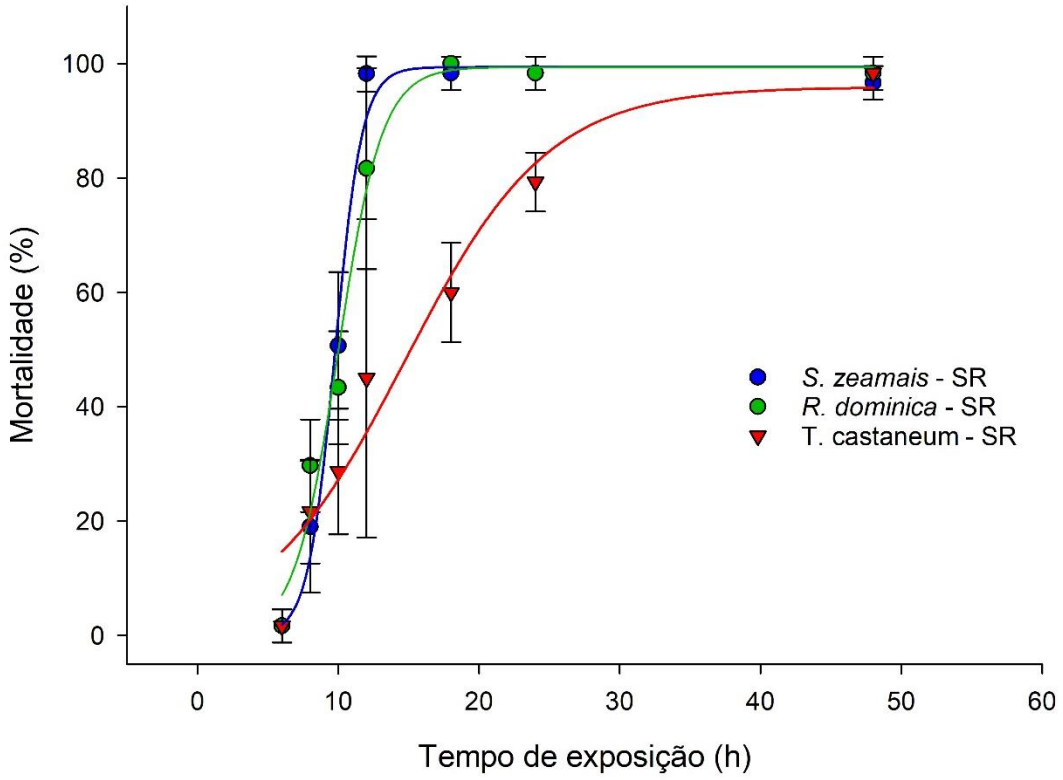


Figura 3: Porcentagem de Mortalidade de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* em função do tempo de exposição ao AITC (49 μL kg^{-1}) no sistema sem recirculação (SR) na altura de 1,0 m na coluna de grãos.



3.2. Taxa instantânea de crescimento populacional

As curvas de regressão da taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) das três espécies de insetos-praga avaliadas em milho armazenado foram obtidas após a exposição ao AITC nos sistemas com e sem recirculação, em diferentes alturas da coluna de grãos (Figura 4, Tabela 3). No sistema sem recirculação, entretanto, não foi possível ajustar as curvas de r_i para os adultos de *S. zeamais* e *R. dominica* no topo da coluna de grãos (1,0 m), pois não houve desenvolvimento dessas espécies nessa posição, mesmo no menor tempo de exposição avaliado (6 h). Nessa condição, observou-se redução de ri na base e no meio da coluna de grãos para *S. zeamais* e *R. dominica*, com maior redução no sistema com recirculação à medida que o tempo de exposição aumentou.

Para *S. zeamais*, no sistema sem recirculação, os valores de r_i foram de - 0,0001 e - 0,0005 em 0,5 e 1,0 m, respectivamente, enquanto no sistema com recirculação variaram

de -0,0012 a -0,0003 na base e no meio da coluna, e de -0,0144 no topo, evidenciando maior supressão do crescimento populacional nesse sistema.

Para *R. dominica*, no sistema sem recirculação, os valores de r_i foram positivos e baixos, de 0,0086 em 0,5 m e 0,0112 em 1,0 m, ao passo que, no sistema com recirculação, os valores variaram de 0,0002 a 0,0004, com redução acentuada do crescimento em todas as posições da coluna de grãos. Já para *T. castaneum*, também se observou maior controle no crescimento populacional no sistema com recirculação, com valores de r_i variando de 0,0005 a -0,0011, enquanto no sistema sem recirculação os valores permaneceram mais elevados, entre -0,0107 e -0,0001, dependendo da posição na coluna de grãos.

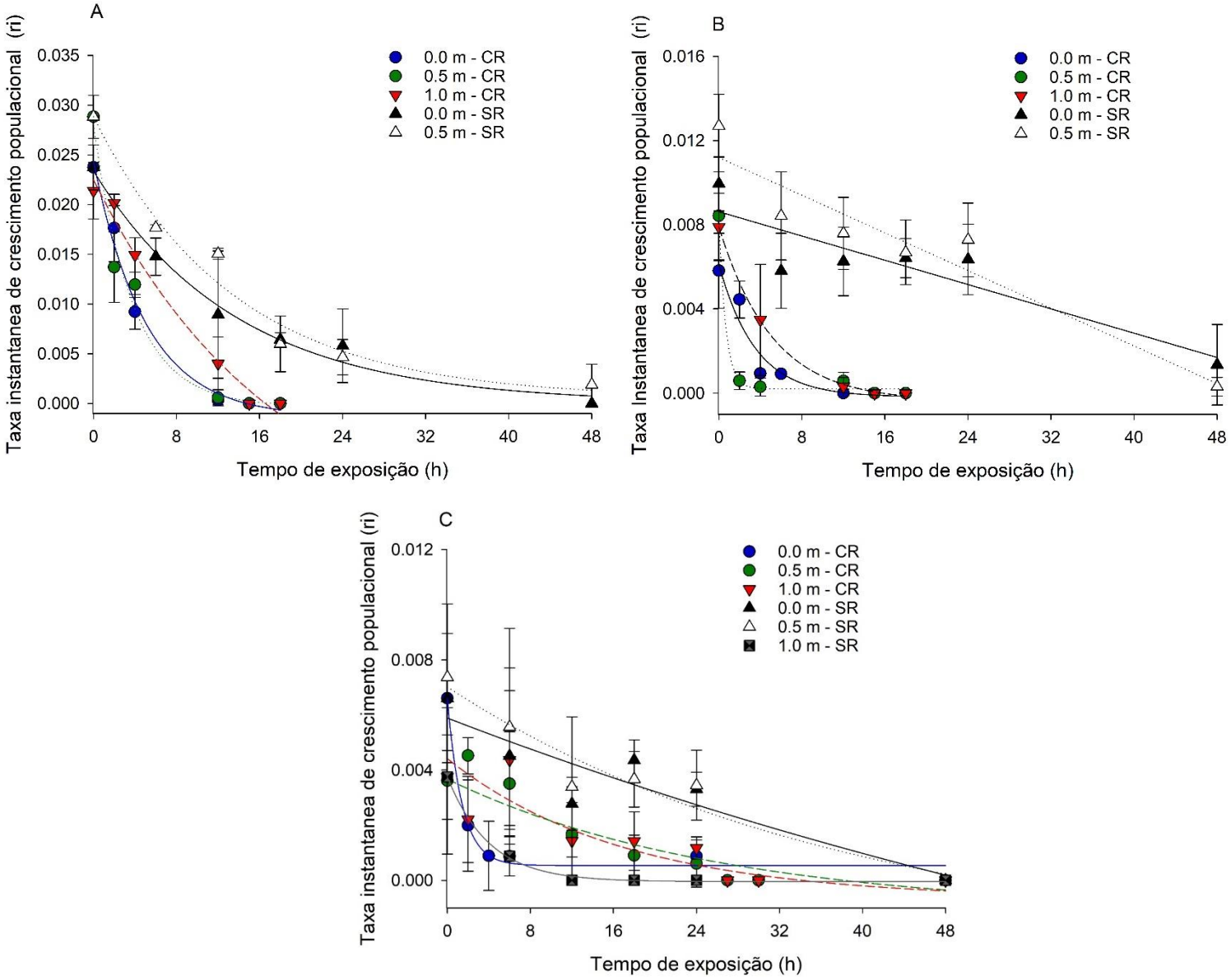
De modo geral, *T. castaneum* apresentou maior tolerância ao AITC do que *S. zeamais* e *R. dominica*, o que ficou evidenciado pelos valores de r_i mais altos e pelos maiores tempos necessários para redução do crescimento populacional. Esses resultados confirmam a importância da recirculação do AITC para promover sua distribuição mais homogênea na massa de grãos e aumentar sua eficiência no controle das espécies avaliadas.

Tabela 3. Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação para taxa instantânea de crescimento (ri) de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* em milho em função do tempo de exposição a 49,0 µL kg^{-1} de AITC, em diferentes posições da coluna grãos, em sistema sem (SR) e com (CR) recirculação.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	Equações de regressão	R^2	EPE
		Sitophilus zeamais		
SR	0,5	$\hat{y} = -0,0001 + 0,0233^{*} e^{(-0,0723 * X)}$	0,98	0,0012
	1,0	$\hat{y} = -0,0005 + 0,0283^{*} e^{(-0,0746 * X)}$	0,97	0,0022
CR	0,0	$\hat{y} = -0,0012 + 0,0257^{*} e^{(-0,1990 * X)}$	0,99	0,0016
	0,5	$\hat{y} = -0,0003 + 0,0284^{*} e^{(-0,2660^{*} X)}$	0,98	0,0021
	1,0	$\hat{y} = -0,0144 + 0,0369^{*} e^{(-0,0569^{*} X)}$	0.98	0,0015
		Rhyzopertha dominica		
SR	0,5	$\hat{y} = 0,0086 - 0,0001^{*} X$	0,80	0,0014
	1,0	$\hat{y} = 0,0112 - 0,0002^{*} X$	0,90	0,0014
CR	0,0	$\hat{y} = -0,0002 + 0,0063^{*} e^{(-0,2837^{*} X)}$	0,94	0,0007
	0,5	$\hat{y} = 0,0002 + 0,0082^{*} e^{(-1,5297^{*} X)}$	0,99	0,0003
	1,0	$\hat{y} = -0,0004 + 0,0083^{*} e^{(-0,1948^{*} X)}$	0,99	0,0001
		Tribolium castaneum		
SR	0,0	$\hat{y} = -0,0107 + 0,0166^{*} e^{(-0,0088^{*} X)}$	0,83	0,0012
	0,5	$\hat{y} = --0,0025 + 0,0096^{*} e^{(-0,0258^{*} X)}$	0,93	0,0008
	1,0	$\hat{y} = -0,0001 + 0,0038^{*} e^{(-0,2483^{*} X)}$	0,98	0,0099
CR	0,0	$\hat{y} = 0,0005 + 0,0061^{*} e^{(-0,7015^{*} X)}$	0,97	0,0004
	0,5	$\hat{y} = -0,0007 + 0,0051^{*} e^{(-0,0588^{*} X)}$	0,90	0,0006
	1,0	$\hat{y} = -0,0011 + 0,0048^{*} e^{(-0,0380^{*} X)}$	0,76	0,0009

EPE – Erro padrão da estimativa.

Figura 4: Taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) de *S. zeamais*, (A) *R. dominica* (B) *e T. castaneum* (C) em grãos de milho em função do tempo de exposição a 49,0 µL kg^{-1} de AITC, em diferentes posições da coluna grãos, em sistema sem (SR) e com (CR) recirculação.



3.3. Qualidade dos grãos de milho expostos a AITC

Não foi observada variação significativa ($p > 0,05$) nas variáveis teor de água, condutividade elétrica, luminosidade (L*), saturação de cor (C*) e tonalidade de cor (h*), em relação à interação tripla entre o tipo de sistema de aplicação de AITC (CR e SR), altura na coluna de grãos e o tempo de exposição.

Com relação ao teor de água (Tabela 4), os valores variaram de 10,9±0,1% a 12,3±0,1% nos sistemas SR e CR. A condutividade elétrica da solução contendo os grãos de milho apresentou valores que variaram de 6,4±0,8 a 11,2±1,7 $\mu S\ cm^{-1}\ g^{-1}$ (Tabela 5). Os valores obtidos de luminosidade (L*) dos grãos variaram entre 56,3±2,8 e 68,6±3,5 (Tabela 6), sem diferenças significativas entre os sistemas de aplicação de AITC e a altura na coluna de grãos. De forma semelhante, os valores obtidos de tonalidade de cor (h*) (Tabela 7) e da saturação de cor (C*) (Tabela 8) variaram nas faixas de 75,2±4,5 a 82,6±3,0 e de 22,0±2,6 a 31,7±3,5, respectivamente, demonstrando uma tendência de variação sem significância estatística.

Tabela 4. Teor de água (%, b.u.) em grãos de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem (SR) e com recirculação (CR) e em diferentes posições da coluna grãos, por até 48 h

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	0	6	12	18	24	48
SR	0,0	11,7±0,1	12,3±1,1	12,0±0,1	10,9±0,1	11,1±0,1	11,5±0,1
	0,5	11,7±0,3	11,8±0,1	12,1±0,1	11,0±0,1	11,1±0,1	11,6±0,2
	1,0	11,6±0,3	11,7±0,1	12,3±0,1	11,3±0,2	11,5±0,1	11,4±0,1
CR	0,0	11,7±0,1	11,6±0,3	11,3±0,1	11,2±0,1	11,4±0,1	11,8±0,1
	0,5	11,7±0,3	12,1±0,1	11,4±0,1	11,3±0,1	11,4±0,1	11,6±0,3
	1,0	11,6±0,3	12,0±0,1	11,6±0,1	11,6±0,2	11,8±0,1	11,7±0,1

Tabela 5. Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}) em grãos de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem (SR) e com recirculação (CR) e em diferentes posições da coluna grãos, por até 48 h

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	0	6	12	18	24	48
SR	0,0	8,7±0,8	11,4±2,4	9,6±0,8	8,6±0,4	8,1±1,9	11,2±1,7
	0,5	7,4±0,5	9,9±2,2	7,4±0,4	9,2±1,0	7,2±0,6	8,3±0,4
	1,0	8,0±0,3	8,7±1,2	9,2±1,9	9,9±0,9	8,4±1,0	9,4±2,0
CR	0,0	8,7±0,8	7,1±1,3	9,7±1,9	8,1±1,3	6,4±0,8	8,7±0,8
	0,5	7,4±0,5	8,3±1,8	8,4±1,3	7,4±0,2	7,8±1,3	7,4±0,5
	1,0	8,0±0,3	8,6±0,4	9,3±3,9	8,3±1,9	9,1±1,3	8,0±0,3

Tabela 6. Luminosidade (L*) em grãos de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem (SR) e com recirculação (CR) e em diferentes posições da coluna grãos, por até 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	0	6	12	18	24	48
SR	0,0	65,5±5,5	63,4±1,2	56,4±3,8	61,1±1,3	61,1±1,3	61,1±3,2
	0,5	59,8±7,3	63,2±4,3	58,7±2,2	56,3±2,8	64,8±6,3	66,1±5,8
	1,0	59,7±1,0	68,6±3,5	60,4±1,5	60,5±1,7	59,3±5,5	62,6±3,4
CR	0,0	65,5±5,5	65,6±7,5	66,3±3,4	62,8±4,2	60,9±2,5	65,1±3,3
	0,5	59,8±7,3	65,6±1,3	63,4±4,5	30,8±3,2	64,6±1,7	67,7±2,8
	1,0	59,7±1,0	68,1±6,5	63,0±1,7	70,4±4,5	62,7±8,1	65,6±7,0

Tabela 7. Tonalidade de cor (h*) em grãos de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem (SR) e com recirculação (CR) e em diferentes posições da coluna grãos, por até 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	0	6	12	18	24	48
SR	0,0	81,2±2,3	79,5±2,0	77,0±1,5	80,5±1,3	77,5±3,9	80,2±3,9
	0,5	77,9±1,7	80,2±1,3	79,6±1,3	78,6±0,5	78,2±3,4	80,7±0,5
	1,0	78,9±1,1	80,2±3,3	79,6±5,2	79,2±2,9	79,9±1,3	78,9±2,1
CR	0,0	81,2±2,3	80,9±3,8	77,4±1,7	82,6±3,0	75,2±4,5	80,6±3,0
	0,5	77,9±1,7	76,5±1,7	78,9±1,9	77,6±1,5	80,2±1,1	80,7±2,0
	1,0	78,9±1,1	81,6±3,6	78,5±4,4	81,9±3,1	79,2±5,4	79,1±5,5

Tabela 8. Saturação de cor (C*) em grãos de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem (SR) e com recirculação (CR) e em diferentes posições da coluna grãos, por até 48 h.

Sistema	Posição na coluna de grãos (m)	0	6	12	18	24	48
SR	0,0	24,5±1,7	25,2±4,4	26,4±3,4	26,5±2,6	28,2±4,1	22,8±1,0
	0,5	25,7±2,6	22,2±2,7	30,9±3,9	25,1±0,6	24,8±4,0	26,5±5,0
	1,0	31,7±3,5	26,5±1,2	25,1±2,0	28,4±4,1	26,4±2,4	26,6±1,9
CR	0,0	24,5±1,7	26,9±5,6	23,2±2,0	23,2±0,9	25,1±0,8	22,0±2,6
	0,5	25,7±2,6	26,1±1,8	29,5±4,5	25,0±2,7	22,6±0,6	23,2±2,9
	1,0	31,7±3,5	22,4±1,0	30,8±1,6	30,4±10,3	23,1±2,2	32,4±7,8

4. DISCUSSÃO

A toxicidade do isotiocianato de alilo (AITC) sobre espécies de insetos-praga de grãos armazenados tem sido amplamente documentada na literatura (Priyadharshini et al., 2025). Este composto demonstra significativo potencial como fumigante no controle de pragas em sistemas de armazenamento de grãos, inclusive contra populações resistentes à fosfina (SANTOS et al., 2011; FREITAS et al., 2016). Essas características posicionam o AITC como uma alternativa promissora para o manejo integrado de pragas, especialmente em cenários onde os métodos convencionais apresentam limitações.

Até o momento, existem poucos estudos avaliando o impacto da recirculação de AITC no controle de insetos em grãos armazenados. O único relato disponível na literatura foi realizado por Ceron et al. (2023), que determinaram as doses letais de AITC para *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* utilizando um protótipo com capacidade estática de 60 kg de milho. Nesse estudo, o ponto de emissão de AITC foi posicionado na base do silo, conduzindo o composto até o topo durante um período de exposição de 48 h. Os resultados indicaram que *T. castaneum* apresentou maior tolerância ao AITC, com valores estimados de CL_{95} de até 49,0 μL kg^{-1} a uma altura de 1,0 m.

No presente estudo, avaliamos o efeito da recirculação de AITC a 49,0 μL kg^{-1}, variando o tempo de exposição e posicionando o ponto de emissão do composto no topo do protótipo, com recirculação no sentido anti-horário. A análise dos pontos críticos inferior (PcI) e superior (PcU) das curvas de mortalidade revelou que o tempo necessário para alcançar mortalidade total e uniforme foi inferior a 48 h para todas as espécies estudadas. Esses achados destacam a relevância da recirculação como estratégia para otimizar a distribuição e a eficácia do AITC na coluna de grãos.

Ainda não existem relatos na literatura descrevendo os mecanismos específicos de defesa de *T. castaneum* contra o AITC. Entretanto, estudos com fosfina identificaram enzimas de detoxificação, como as glutationa S-transferases, e mutações genéticas associadas à resistência em *T. castaneum* (OPIT et al., 2012; JAGADEESAN et al., 2012; GAUTAM et al., 2016; NAYAK et al., 2021). Esses mecanismos podem contribuir para a maior tolerância dessa espécie ao AITC, embora sejam necessárias investigações adicionais para confirmar essa hipótese.

Outro aspecto relevante observado neste estudo foi a maior volatilização do AITC no sistema com recirculação, o que contribuiu para a homogeneidade e eficácia no controle dos insetos. A aeração, além de reduzir e padronizar a temperatura da massa de grãos (RANALLI et al., 2002; ARTHUR et al., 2008; MORRISON et al., 2020), mostrou-

se uma ferramenta eficaz para distribuir o AITC de forma uniforme. A combinação de recirculação e aeração pode representar uma vantagem operacional significativa, reduzindo o tempo necessário para o controle efetivo de pragas em comparação com os métodos tradicionais.

Os resultados referentes à qualidade dos grãos expostos ao AITC, tanto em sistemas com quanto sem recirculação, indicaram que o composto não altera características importantes, como teor de água, condutividade elétrica e cor. Resultados semelhantes foram observados em outros estudos.

Para o AITC, embora eficaz como biofumigante, poucos estudos avaliaram especificamente sua eficiência em diferentes temperaturas de armazenamento (PRIYADHARSHINI et al., 2025). Estudos experimentais indicam baixa concentração residual e maior volatilização em 25–30 °C, sem comprometer a qualidade final do produto (SANTOS et al., 2010; PAES et al., 2011). Apesar dos resultados promissores, ainda existem variáveis que precisam ser exploradas em estudos futuros, como temperatura, direção do movimento do ar e taxas de fluxo específicas, que podem influenciar diretamente a atividade biológica do AITC e a mortalidade dos insetos (OLAIMAt et al., 2013; YANG et al., 2017). Esses fatores podem alterar as concentrações e os tempos necessários para o controle efetivo de pragas na massa de grãos, sendo essenciais para a otimização do processo de fumigação.

Por fim, a alta volatilidade do AITC tem incentivado pesquisas sobre estratégias de aplicação controlada, como a microencapsulação, visando melhorar a estabilidade, aumentar a biodisponibilidade e reduzir o risco de exposição para os manipuladores (KO et al., 2012; AYTAC et al., 2014; MARUTHUPANDY et al., 2019; JIN et al., 2020). Embora ainda não existam estudos avaliando o uso de AITC encapsulado para o controle de pragas em grãos armazenados, essa abordagem poderia facilitar a liberação controlada do composto, protegê-lo do ambiente externo e até mascarar seu odor penetrante (PANDEY et al., 2024). No entanto, são necessárias investigações adicionais sobre o comportamento do AITC na massa de grãos e nas condições de armazenamento antes de avançar para aplicações práticas em silos.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que a recirculação do isotiocianato de alilo constitui uma estratégia eficaz para melhorar sua distribuição na massa de grãos, permitindo o controle uniforme e mais rápido das principais pragas do milho armazenado,

sem comprometer a qualidade dos grãos. Isso indica que o uso combinado de AITC e recirculação pode reduzir o tempo de tratamento e oferecer uma alternativa promissora e mais sustentável aos fumigantes convencionais, especialmente em sistemas de manejo de pragas onde a resistência a produtos químicos é um problema crescente. Entretanto, para viabilizar sua aplicação em escala comercial, ainda são necessários estudos adicionais que aprofundem as condições operacionais ideais, incluindo temperatura, fluxo de ar, escalonamento do sistema e possíveis estratégias para minimizar limitações práticas, como a volatilidade do composto e eventuais resíduos odoríferos.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. “Moisture Relationships of Plant-Based Agricultural Products”. **ASABE Standards,** 2013.

ABDELRAZIK, A.; SALLAM, A.; SALEM, H., et al. “Potential Insecticidal Activity of some Medicinal Plants Essential Oils against Red Flour Beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae)”. **Journal of Plant Protection and Pathology**, v. 9, n. 4, p. 253–259, 2018.

AGRAFIOTI, P KALOUDIS E, BANTAS S. et al. “Modeling the distribution of phosphine and insect mortality in cylindrical grain silos with Computational Fluid Dynamics: Validation with field trials”. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, p. 105383, 2020.

ALZAHRANI, S. M.; EBERT, P. R. “Pesticidal Toxicity of Phosphine and Its Interaction with Other Pest Control Treatments”. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 45, n. 3, p. 2461–2473, 2023.

ARTHUR, F. H., YANG, Y., WILSON, L. T., et al. “Feasibility of automatic aeration for insect pest management for rice stored in east texas”. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 24, n. 0883–8542, p. 345–350, 2008.

AYTAC, Z., DOGAN S. Y., TEKINAY, T. et al. “Release and antibacterial activity of allyl isothiocyanate/β-cyclodextrin complex encapsulated in electrospun nanofibers”. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 120, p. 125–131, 2014.

CAGLAR, M. U. et al. Sicegar: R package for sigmoidal and double-sigmoidal curve fitting and classification. **PeerJ**, v. 6, e4556, 2018. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.4251.

CERÓN, D. A. C., DE ALENCAR, E. R., FARONI, L. R. D. A., et al. “Toxicity of Allyl Isothiocyanate Applied in Systems With or Without Recirculation For Controlling

Sitophilus zeamais, Rhyzopertha dominica, and *Tribolium castaneum* in Corn Grains". **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2023.

COSTA, R. R.; SOUSA, A. H. DE; FARONI, L. R. D. A.; DHINGRA, O. D.; PIMENTEL, M. A. G. "Toxicity of mustard essential oil to larvae and pupas of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae)". **Stored Product Protection**, v. 9, p. 908–913, 2002.

DE SOUZA, L. P., FARONI, L. R. D., LOPES, L. M., DE SOUSA, A. H., & PRATES, L. H. F. (2018). "Toxicity and sublethal effects of allyl isothiocyanate to *Sitophilus zeamais* on population development and walking behavior". **Journal of Pest Science**, *91*(2), 761–770.

FREITAS, R. C. P., FARONI, L. R. D. A., HADDI, K., et al. "Allyl isothiocyanate actions on populations of *Sitophilus zeamais* resistant to phosphine: Toxicity, emergence inhibition and repellency". **Journal of Stored Products Research**, v. 69, p. 257–264, 2016.

GAUTAM, S. G., OPIT, G. P., KONEMANN, C., et al. "Phosphine resistance in saw-toothed grain beetle, *Oryzaephilus surinamensis* in the United States". **Journal of Stored Products Research**, v. 89, p. 101690, 2020.

GAUTAM, S. G.; OPIT, G. P.; HOSODA, E. "Phosphine resistance in adult and immature life stages of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) and *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) populations in California". **Journal of Economic Entomology**, v. 109, n. 6, p. 2525–2533, 2016.

HAMZA, A. F., EL-ORABI, M. N., GHARIEB, O. H., et al. "Response of *Sitophilus granarius* L. to fumigant toxicity of some plant volatile oils". **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 9, n. 1, p. 8–14, 2016.

ISSHIKI, K.; TOKUOKA, K.; MORI, R.; CHIBA, S. “Preliminary Examination of Allyl Isothiocyanate Vapor for Food Preservation”. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 56, n. 9, p. 1476–1477, 12 jan. 1992.

JAGADEESAN, R.; COLLINS, P. J.; DAGLISH, G. J.; EBERT, P. R.; SCHLIPALIUS, D. I. “Phosphine resistance in the rust red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae): Inheritance, gene interactions and fitness costs”. **PLoS ONE**, v. 7, n. 2, 2012.

JIN, F.Z.; DING, R. X.; DING, K., et al. “Preparation of allyl isothiocyanate microencapsulation and its application in pork preservation”. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 9, p. 1–15, 2020.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V.; WILCKE, W. F.; CARRILLO, M. A.; CANNON, C. A. “Low-temperature aeration to control Indianmeal moth , *Plodia interpunctella* (Hu ¨ bner), in stored grain in twelve locations in the United States : a simulation study”. v. 43, p. 177–192, 2007.

KO, J. A.; KIM, W. Y.; PARK, H. J. “Effects of microencapsulated Allyl isothiocyanate (AITC) on the extension of the shelf-life of Kimchi”. **International Journal of Food Microbiology**, v. 153, n. 1–2, p. 92–98, 2012.

LORINI, I. “Manual Técnico para o Manejo Integrado de Pragas de grãos e Cereais Armazenados”. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria**, p 2005.

MANYES, L., LUCIANO, F. B., MAÑES, J., et al. "In vitro antifungal activity of allyl isothiocyanate (AITC) against *Aspergillus parasiticus* and *Penicillium expansum* and evaluation of the AITC estimated daily intake". **Food and Chemical Toxicology**, v. 83, p. 293–299, 2015.

MARUTHUPANDY, M.; SEO, J. “Allyl isothiocyanate encapsulated halloysite covered with polyacrylate as a potential antibacterial agent against food spoilage bacteria ". **Materials Science and Engineering C**, v. 105, p. 110016, 2019.

MASKAN, M. “Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat”. **Journal of Food Engineering**, 47: 51–57, 2001

MASUPHA, P. V.; THAI, M.; SEBITIA, M. M. “Assessment of grain storage structures, pests and their management practices in Lesotho”. **Journal of Agricultural Extension and Rural Development**, v. 16, p. 106–115, 2024.

MORRISON, W. R., ARTHUR, F. H., WILSON, L. T., et al. “Aeration to Manage Insects in Wheat Stored in the Balkan Peninsula: Computer Simulations Using Historical Weather Data”. **Agronomy**, v. 10, n. 12, p. 1927, 2020.

MOURA, E. da S., FARONI, L. R. D. A., ZANUNCIO, J. C., et al. "Insecticidal activity of *Vanillosmopsis arborea* essential oil and of its major constituent α-bisabolol against *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Chrysomelidae)". **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 3723, 2019.

NAYAK, M. K., JAGADEESAN, R., SINGARAYAN, V. T., et al. "First report of strong phosphine resistance in stored grain insects in a far northern tropical region of Australia, combining conventional and genetic diagnostics". **Journal of Stored Products Research**, v. 92, p. 101813, 2021.

NOYES, R. T., PHILLIPS, T. W., CUPERUS, G. W., et al. “Advances in recirculation fumigation technology in the USA”. In: Proceedings of the 7th International Working Conference on Stored-product Protection, 14-19 October 1998, Beijing, P. R. China (eds. Jin, Z., Liang, Q., Liang, Y., Tan, X., & Guan, L.). **Sichuan Publishing House of Science and Technology**, 454-461. 1999.

OLAIMAT, A. N.; HOLLEY, R. A. “Effects of changes in pH and temperature on the inhibition of Salmonella and Listeria monocytogenes by Allyl isothiocyanate”. **Food Control**, v. 34, n. 2, p. 414–419, 2013.

OLATUNDE, G.; ATUNGULU, G. G.; SADAKA, S. “CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations”. **Biosystems Engineering**, v. 151, p. 286–297, 2016.

OPIT, G. P.; PHILLIPS, T. W.; AIKINS, M. J.; HASAN, M. M. “Phosphine resistance in *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica* from stored wheat in Oklahoma”. **Journal of Economic Entomology**, v. 105, n. 4, p. 1107–1114, 2012.

PAES, J. L., FARONI, L. R. D. A., DHINGRA, O. D., et al. “Insecticidal fumigant action of mustard essential oil against *Sitophilus zeamais* in maize grains”. **Crop Protection**, v. 34, p. 56–58, 2012.

PAES, J. L. FARONI, L. R. D. A., MARTINS, M. A., et al. “Diffusion and sorption of allyl isothiocyanate in the process of fumigation of maize. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 296–301, 2011.

PANDEY, V. K. et al. Bioactive properties of clove (*Syzygium aromaticum*) essential oil nanoemulsion: A comprehensive review. **Heliyon**, v. 10, n. 1, p. e22437, 2024.

PIMENTEL, M. A. G., FARONI, L. R. D., BATISTA, M. D., et al. "Resistance of stored-product insects to phosphine". **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1671–1676, 2008.

PIMENTEL, M. A. G., FARONI, L. R. D. A., GUEDES, R. N. C., et al. "Phosphine resistance in Brazilian populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae)". **Journal of Stored Products Research**, v. 45, n. 1, p. 71–74, 2009.

PRATES, L. H. F., FARONI, L. R. D. A., HELENO, F. F., DE QUEIROZ, M. E. L. R., DE SOUSA, A. H., SILVA, M. V. D. A. Eugenol diffusion coefficient and its potential to control *Sitophilus zeamais* in rice. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1-11, 2019.

QUILES, J. M., NAZARETH, T. D. M., LUZ, C., et al. "Development of an Antifungal and Antimycotoxigenic Device Containing Allyl Isothiocyanate for Silo Fumigation". **Toxins**, v. 11, n. 137, 2019.

RANALLI, R. P., HOWELL JR, T. A., ARTHUR, F. H., et al. "Controlled ambient aeration during rice storage for temperature and insect control". **Applied Engineering in Agriculture**, v. 18, n. 0883–8542, p. 485–490, 2002.

SAITO, M.; LUCHINI, F. "Substâncias Obtidas De Plantas E a Procura Por Praguicidas Eficientes E Seguros Ao Meio Ambiente". **Embrapa-Cnpq**, v. 12, p. 46, 1998.

SANTOS, S. B.; MARTINS, M. A.; D'ANTONINO FARONI, L. R.; JUNIOR, V. R.; DHINGRA, O. D. "Quality of maize grains treated with allyl isothiocyanate stored in hermetic bags". **Journal of Stored Products Research**, v. 46, n. 2, p. 111–117, 2010.

SANTOS, J. C.; FARONI, L. R. A.; SOUSA, A. H.; GUEDES, R. N. C. "Fumigant toxicity of allyl isothiocyanate to populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum*". **Journal of Stored Products Research**, v. 47, n. 3, p. 238–243, 2011.

SHUNMUGAM, G.; JAYAS, D. S.; WHITE, N. D. G.; MUIR, W. E. Diffusion of carbon dioxide through grain bulks. **Journal of Stored Products Research**, v. 41, n. 2, p. 131-144, 2005.

UNEP. "Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer: Report of the Methyl Bromide Technical Options Committee - Assessment. Nairobi: UNEP, 304 p. 1995.

VIEIRA, R. D., PENARIOL A. L., PERECIN D., et al. "Condutividade elétrica e teor de água inicial das sementes de soja". **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1333–1338, 2002.

VILELA, A. .O. ; FARONI, L. R.A.; SOUSA, A. H.; PIMENTEL, M. A.G. ; GOMES, J. L. Toxicological and physiological effects of allyl isothiocyanate upon *Callosobruchus maculatus*. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101625, 2020a.

VILELA, A. O. ; FARONI, L. R. A. ; RODRIGUES, A. A. Z. ; HELENO, F. F. ; QUEIROZ, M. E. L. R. ; MOURA, E. S. ; GOMES, J. L. . Headspace solid phase microextraction: validation of the method and determination of allyl isothiocyanate persistence in cowpea beans. **ACS Omega**, v. 5, p. 21354-21373, 2020b.

VILELA, A. O.; FARONI, L R A ; GOMES, J. L. ; SOUSA, A. H. ; CECON, P. R. Allyl isothiocyanate as a fumigant in the cowpea and its effect on the physical properties of the grain. Revista Ciencia Agronomica, v. 52, p. 1-7, 2021.

WALTHALL W. K., STARK J.D. "A comparison of acute mortality and population growth rate as endpoints of toxicological effect". **Ecotoxicol Environ Saf**. v. 37(1):45-52. 1997.

YANG, Y.; ZHANG, Q.; SUBRAMANYAM, B.; FERNANDEZ, A. Regional analysis of bin aeration as an alternative to insecticidal control for post-harvest management of *Sitophilus oryzae* (L.) and *Rhyzopertha dominica* (F.). **Ecological Modelling**, v. 359, p. 165-181, 2017.

ZASADA, I. A.; FERRIS, H. "Sensitivity of Meloidogyne javanica and *Tylenchulus semipenetrans* to isothiocyanates in laboratory assays". **Phytopathology**, v. 93, n. 6, p. 747–750, 2003.

CAPÍTULO 2: EFEITO DA TEMPERATURA NA DINÂMICA DE MORTALIDADE DE *Sitophilus zeamais* E *Tribolium castaneum* EM MILHO TRATADO COM ISOTIOCIANATO DE ALILO SOB RECIRCULAÇÃO DE AR

RESUMO

A eficiência de fumigantes naturais em grãos armazenados pode ser fortemente influenciada pelas condições térmicas de armazenamento. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura (15, 25 e 35 °C) sobre a eficiência da aplicação de isotiocianato de alilo (AITC) em sistemas com recirculação de ar no controle de *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum* em milho armazenado, considerando a dinâmica de mortalidade e a qualidade dos grãos. Os experimentos foram conduzidos em diferentes tempos de exposição, e os dados de mortalidade foram ajustados por modelos de regressão não linear, permitindo a determinação dos pontos críticos de exposição — ponto crítico inferior (PcI) e ponto crítico superior (PcU) — sob distintas condições térmicas. Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura reduziu significativamente os intervalos críticos de mortalidade (PcI–PcU) no sistema com recirculação (CR), com reduções superiores a 80% entre 15 °C e 35 °C. Em condições com temperatura superior a 25 °C, o sistema CR (0,46 $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$) promoveu mortalidade superior a 95% em menos de 32 h de exposição. Em contraste, no sistema sem recirculação (SR), a mortalidade foi restrita à camada superior da coluna de grãos, independentemente da temperatura, evidenciando a limitação da difusão natural do AITC e a importância da recirculação para garantir controle homogêneo ao longo da massa de grãos. De modo geral, a variação da temperatura não afetou as variáveis de qualidade dos grãos avaliados, incluindo condutividade elétrica e atributos de cor, que permaneceram estáveis entre os tratamentos. Em síntese, a recirculação de AITC associada a temperaturas mais elevadas potencializa a eficiência do controle de insetos-praga, reduzindo o tempo necessário para atingir alta mortalidade, sem comprometer a qualidade do milho. Esses resultados indicam que o uso de AITC com recirculação constitui uma alternativa viável e sustentável à fosfina no manejo de pragas resistentes em sistemas de armazenamento.

Palavras chave: Isotiocianato de alilo (AITC). Temperatura de armazenamento. Manejo de pragas em grãos armazenados.

1. INTRODUÇÃO

No contexto da produção de grãos, o milho destaca-se como uma das principais commodities agrícolas brasileiras, com safras recentes superiores a 130 milhões de toneladas e forte participação nas exportações do país (CONAB, 2025). A expansão dessa cultura ocorreu inicialmente na Região Sul e, nas últimas décadas, avançou intensamente para o Centro-Oeste e outras fronteiras agrícolas, impulsionada por tecnologias adaptadas a condições tropicais e pelo cultivo em segunda safra, sob clima mais quente (KLEIN; LUNA, 2022; SOUZA et al., 2019).

Esses diferentes ambientes de produção resultam em cenários contrastantes de temperatura e umidade durante a colheita, secagem e armazenagem, com regiões de clima subtropical apresentando condições mais amenas e áreas tropicais, como Mato Grosso e Goiás, sujeitas a temperaturas elevadas por grande parte do ano (CONAB, 2025; EMBRAPA, 2021). Em grande parte do território brasileiro, especialmente nas regiões de segunda safra, a combinação de altas temperaturas ambientais e grande volume de grãos exige sistemas de secagem e armazenamento tecnicamente adequados, uma vez que a massa de milho tende a aquecer naturalmente e requer aeração para manutenção de condições seguras ao longo do período de estocagem (EMBRAPA, 2021a).

Os insetos-praga de grãos armazenados, como ectotérmicos, apresentam desenvolvimento e crescimento populacional altamente influenciados pela temperatura, com faixas ótimas geralmente entre 25 e 30°C e inibição abaixo de 15°C. As espécies mais relevantes para o milho armazenado incluem *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae), *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) (Coleoptera: Bostrichidae) e *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae), que causam danos primários e secundários significativos em condições favoráveis (ALENCAR et al., 2011; EMBRAPA, 2021b; FIELDS, 1992).

Para *S. zeamais*, estudos recentes confirmam que temperaturas de 15 °C controlaram completamente a emergência de adultos e a deterioração dos grãos de milho, enquanto 25–30 °C aceleram o ciclo de vida e a infestação (CORTESE et al., 2025). *T. castaneum* mantém movimento e reprodução ativos a 30 °C, com redução drástica abaixo de 10 °C, influenciando sua dispersão na massa de grãos (ARTHUR; KHAJEHALI, 2019). Essas respostas térmicas explicam o potencial explosivo de infestações em ambientes de armazenamento tropicais, onde temperaturas frequentemente excedem 25 °C.

Temperaturas elevadas de armazenamento, especialmente acima de 25 °C, aceleram a respiração dos grãos, favorecendo a proliferação de insetos-praga, fungos toxigênicos e consequentes perdas quantitativas e qualitativas significativas (CAMARGO et al., 2015). Em milho armazenado sob condições tropicais, o aquecimento da massa de grãos (hot spots) resulta em perdas de peso seco que podem atingir 10–20% em poucos meses, associadas à maior atividade metabólica e degradação por pragas primárias (SILVA TAVEIRA et al., 2025; PENAGOS-TABARÉS et al., 2025). Adicionalmente, temperaturas elevadas e umidade relativa acima de 70% promovem a contaminação por micotoxinas como fumonisinas (FB1 e FB2) produzidas por *Fusarium* spp., com níveis superiores a 2.000 $\mu g\ kg^{-1}$ em mais do 90% das amostras de milho brasileiro armazenado inadequadamente (DRAYER et al., 2016; EMBRAPA, 2023; LOPES et al.,2023). A infestação de pragas intensificada por condições térmicas favoráveis agrava a produção de micotoxinas, pois insetos danificam a integridade do grão, facilitando a colonização fúngica e elevando riscos à saúde humana e animal (LIMA et al., 2021; KOSKEI et al., 2020; ROCHA et al., 2024). Esses problemas justificam a necessidade de intervenções químicas ou alternativas, como biofumigação, para controlar pragas e mitigar perdas e contaminação em armazéns tropicais (ALVES et al., 2025).

A fosfina (PH_3) constitui o principal fumigante convencional no controle de pragas em grãos armazenados devido à sua penetração e baixo resíduo (NAYAK et al., 2020). Contudo, décadas de uso intensivo geraram resistência em espécies-chave como *Sitophilus oryzae*, *Rhyzopertha dominica* e *Tribolium castaneum*, por mecanismos como redução respiratória e detoxificação enzimática, exigindo doses e tempos maiores (SHAH et al., 2025; LI et al., 2023).

Adicionalmente, a fosfina apresenta riscos ambientais, à saúde ocupacional e eficácia reduzida em temperaturas baixas, onde o metabolismo dos insetos diminui (ZHANG et al., 2024). Nesse contexto, o isotiocianato de alilo (AITC), principal composto volátil do óleo essencial de mostarda, destaca-se como biofumigante natural eficaz contra populações resistentes à fosfina, com $LC_{99.9}$ de 2,59 $\mu L\ L^{-1}$ em 24 h e ausência de resistência cruzada (SHAH et al., 2025; VILELA et al., 2021).

Estudos sobre fumigação de grãos armazenados demonstram que a temperatura influencia diretamente a toxicidade, difusão e tempo de exposição necessários para controle eficaz de pragas, com fosfina exibindo maior eficácia acima de 20 °C devido ao aumento da respiração dos insetos (AGRAFIOUTI et al., 2021; COLLINS et al., 2022).

Em temperaturas baixas (<15 °C), a fosfina requer exposições prolongadas (até 10 dias) para eliminar estágios imaturos resistentes, enquanto condições quentes (>25 °C) aceleram a sorção e volatilização, mas podem comprometer a uniformidade em grandes massas (COLLINS et al., 2022). A recirculação de fumigantes, amplamente estudada para fosfina, melhora a distribuição homogênea e reduz tempos de exposição em 50–70%, sendo particularmente vantajosa em silos verticais onde a difusão natural é limitada (REZENDE, 2023).

Para o AITC, embora eficaz como biofumigante, poucos estudos avaliaram especificamente sua eficiência em diferentes temperaturas de armazenamento (PRIYADHARSHINI et al., 2025). Evidências experimentais sugerem maior volatilização e toxicidade em 25–30 °C (RODRIGUES JR. et al., 2011; SANTOS et al., 2010), porém ainda faltam dados sobre seu desempenho em unidades de armazenamento de grãos, combinado com sistemas de recirculação e em temperaturas tropicais elevadas (>25 °C), comuns no Brasil.

No Capítulo 1, demonstrou-se que a aplicação de isotiocianato de alilo (AITC) em sistemas com recirculação de ar promove controle eficiente e homogêneo de insetos-praga ao longo da coluna de grãos, minimizando o efeito da posição na massa armazenada e permitindo a definição de parâmetros cinéticos de mortalidade, como os pontos críticos de exposição (PcI e PcU). Entretanto, embora esses resultados evidenciem a importância da recirculação para a distribuição do composto, a eficiência do tratamento pode ser significativamente influenciada por fatores ambientais, especialmente a temperatura. Considerando que sistemas de armazenamento estão sujeitos a variações térmicas, torna-se necessário compreender como a temperatura modula a dinâmica de ação do AITC, particularmente em condições que podem acelerar sua volatilização e a resposta dos insetos. Nesse contexto, o presente capítulo busca avançar na compreensão desses efeitos, avaliando a influência da temperatura sobre a eficiência do AITC em sistemas com e sem recirculação de ar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1.Insetos e milho

As colônias de *S. zeamais* e *T. castaneum* foram mantidas em condições controladas de temperatura (27 ± 2 °C para *S. zeamais* e 30 ± 2 °C para *T. castaneum*) e

umidade relativa (65 ± 5%), assegurando insetos padronizados e geneticamente homogêneos para os bioensaios.

O milho utilizado no experimento, com teor de água de 12% (b.u.), foi fornecido pela Fábrica de Ração da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Cada teste utilizou 60±1 kg de milho, o qual permanecia armazenado sob refrigeração a 7 °C para manter a estabilidade das características físicas durante os períodos experimentais, da mesma forma foi acondicionado previamente às temperaturas de 15, 25 ou 35 °C antes de cada teste. Lote adicional de 80 kg do mesmo milho foi utilizado para as análises de qualidade do grão e mantido também na câmara de refrigeração a 7 °C.

2.2.Isotiocianato de Alilo (AITC)

O AITC (Sigma-Aldrich, pureza ≥ 95%) foi armazenado a 5 ± 1 °C, protegido da luz, garantindo estabilidade do composto durante todo o período experimental.

2.3 Bioensaios de toxicidade

Os bioensaios foram conduzidos em protótipos de silos experimentais de PVC (capacidade 60 kg), aplicando a concentração fixa de 49,0 μL kg^{-1} de AITC no topo da coluna de grãos. Testaram-se dois sistemas de aplicação com recirculação (CR) (vazão específica de 0,46 m^3 min^{-1} t^{-1}) e sem recirculação (SR) totalmente lacrado, sob três temperaturas controladas em câmaras climáticas: 15 °C, 25 °C e 35 °C. A aplicação do AITC, foi realizada em algodão contido em placas de Petri de vidro de 54 mm de diâmetro. Para estimar a volatilização, a massa (g) do AITC referente a cada teste foi determinada em balança analítica antes e depois de cada período de exposição. Dessa forma, foi possível calcular o percentual do AITC (m/m) perdido.

Em 15° C os períodos de exposição foram de 6, 12, 18, 24, 36 e 48h, em 25 °C os de 4, 6, 12, 18, 24, 36 e 48h, e em 35°C foram de 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36 e 48h. Os controles de cada temperatura constituíram em testes com os mesmos períodos de exposição, expostos a recirculação de ar, sem AITC. A mortalidade foi avaliada em três alturas da massa de grãos (0,0 m, 0,5 m e 1,0 m da base). Os dados de mortalidade corrigida obtidos com a Equação 1 de Abbott (1925), foram ajustados por regressão não linear sigmoidal de três parâmetros (Equação 2), para logo estimar os pontos críticos inferior (PcI - Lower Critical Point) e superior (PcU - Upper Critical Point) a partir dos parâmetros obtidos em cada regressão. (Equação 3 e 4).

$$MC(\%) = \frac{\%Mo - \%\,Mc}{100 - \%Mc}$$ Equação (1)

Em que:

MC = Mortalidade corrigida

Mo = Mortalidade observada

Mc = Mortalidade no tratamento controle

$$f(x) = \frac{a}{1+e^{(\frac{-(x-x_0)}{b})}}$$ Equação (2)

Em que:

f(x) = % Mortalidade

α = Mortalidade máxima teórica

X_0 = Valor de X em que F(x) alcança a Metade do valor máximo em α

b = Inclinação

x = Tempo de exposição

$$Pcl = x_0 - 2b$$ Equação (3)

$$Pcu = x_0 + 2b$$ Equação (4)

Em que:

PcI = Lower Critical Point

PcU = Upper Critical Point

X_0 = Valor de X em que F(x) alcança a Metade do valor máximo em α

b = Inclinação

2.3.Taxa instantânea de crescimento populacional (ri)

A taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) foi calculada para populações de *S. zeamais* e *T. castaneum* expostas ao AITC em sistema com recirculação (CR) e sem recirculação (SR), nas três temperaturas testadas (15, 25 e 35 °C).

Os insetos e os grãos de cada gaiola após a exposição ao AITC, foram transferidos para potes de 14 cm de diâmetro e armazenados em câmara climática, sob condições de temperatura e umidade relativa adequadas ao desenvolvimento de cada espécie. Após 55

dias de armazenamento, os insetos foram novamente contabilizados, e a taxa instantânea de crescimento populacional foi estimada pela equação de Walthall e Stark (1997) (Equação 5), permitindo quantificar o efeito do tratamento sobre a dinâmica populacional pós-exposição.

Os insetos e grãos de cada gaiola foram depositados em potes de 14 cm de diâmetro e armazenados em câmara climática, adotando-se a temperatura e umidade relativas adequadas para o desenvolvimento apropriado de cada espécie. Após o período de 55 dias de armazenamento, os insetos foram novamente contabilizados e a taxa instantânea de crescimento populacional foi determinada, utilizando-se a equação de Walthall e Stark (1997) (Equação 5), permitindo quantificar o impacto do tratamento na dinâmica populacional pós-exposição.

$$ri = \frac{\left[Ln\left(\frac{N_f}{N_0}\right)\right]}{\Delta T} \qquad \text{Equação (5)}$$

Em que:

ri = Taxa de crescimento populacional

N_0 = Número inicial de insetos

N_f = Número final de insetos

ΔT = Tempo de armazenamento

2.4. Qualidade dos grãos de milho expostos ao AITC nas diferentes temperaturas

A avaliação da qualidade dos grãos de milho foi conduzida conforme os procedimentos descritos no Capítulo 1, considerando as seguintes variáveis físicas: teor de água, condutividade elétrica e atributos de cor (L*, C* e h*). No presente capítulo, as análises foram realizadas com o objetivo de verificar o efeito da temperatura associada à aplicação de isotiocianato de alilo (AITC) sobre a qualidade dos grãos ao longo do tempo de exposição. As amostras analisadas considerando-se os tempos de exposição 0 (controle, sem tratamento), 6, 12, 18, 24 e 48 h, sob diferentes temperaturas de tratamento.

2.5.Analises estatísticas

Os pontos críticos da curva de mortalidade, ponto crítico inferior (PcI) e ponto crítico superior (PcU) foram obtidos ao submeter os dados de mortalidade a análise de

regressão não linear de três parâmetros, utilizando o software SigmaPlot (v.15, Systat Software Inc.). Os dados da taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) e da volatilização do AITC foram ajustados por modelos de regressão linear ou não linear, sendo selecionado, em cada caso, o modelo com melhor ajuste aos dados. A qualidade dos ajustes dos modelos foi avaliada com base no coeficiente de determinação (R^2) e no erro padrão da estimativa (EPE). As variáveis de qualidade dos grãos, teor de água (método gravimétrico), condutividade elétrica (S cm^{-1} g^{-1}) e parâmetros de cor (L*, a*, b*), foram submetidas à análise de variância (ANOVA), considerando nível de significância de 5% ($p < 0,05$), utilizando o software StatPlus (v.5, AnalystSoft Inc., Canadá). Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS

3.1. Volatilização do AITC

A volatilização do isotiocianato de alilo (AITC) foi avaliada em sistemas com recirculação de ar (CR) e sem recirculação (SR) ao longo do tempo de exposição (3 a 48 h) e sob diferentes temperaturas de armazenamento (15, 25 e 35 °C) (Figuras 1 e 2; Tabela 1). No sistema sem recirculação (SR), observou-se aumento da volatilização com a elevação da temperatura. A 35 °C, a volatilização atingiu valores próximos de 100% após 24 h de exposição, enquanto, a 15 °C e 25 °C, os valores permaneceram inferiores a 40% no mesmo período. Esses resultados evidenciam a limitação da difusão do AITC na ausência de recirculação, especialmente em temperaturas mais baixas.

No sistema com recirculação (CR), os dados de volatilização ajustaram-se adequadamente ao modelo sigmoidal de três parâmetros, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,98 e 0,99. Os parâmetros estimados indicaram variação da dinâmica de volatilização em função da temperatura. O tempo necessário para atingir 50% da volatilização (X_0) foi de 7,51 h a 15 °C, 12,69 h a 25 °C e 17,07 h a 35 °C.

O parâmetro de inclinação (b) apresentou valores de 2,52, 6,59 e 8,51, respectivamente, indicando diferenças na taxa de transição do processo de volatilização entre as condições avaliadas. A volatilização máxima teórica (a) variou entre 81,8% e 102,2%, dependendo da temperatura. De modo geral, a recirculação de ar promoveu maior uniformidade na dinâmica de volatilização ao longo do tempo, enquanto a temperatura influenciou a velocidade e a extensão do processo.

Figura 1. Volatilização (%) do AITC vs. tempo de exposição (h) no sistema sem recirculação (SR), ajustada ao modelo sigmoidal: 15, 25 e 35°C

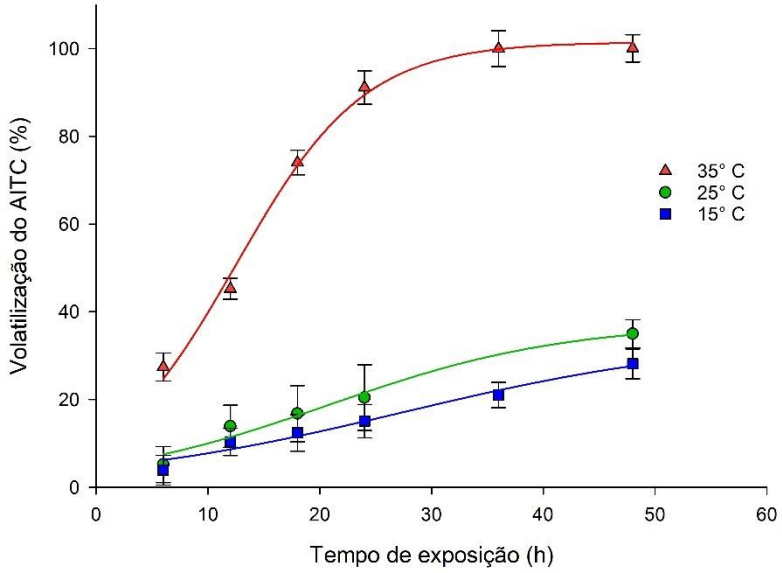


Figura 2. Volatilização (%) do AITC vs. tempo de exposição (h) no sistema com recirculação (CR), ajustada ao modelo sigmoidal: 15, 25 e 35°C

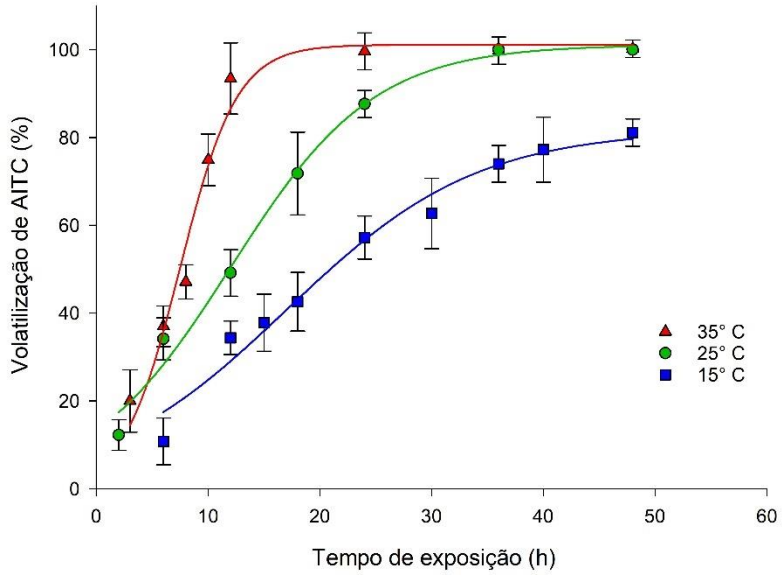


Tabela 1: Parâmetros da regressão sigmoidal da volatilização do AITC no sistema com (CR) e sem recirculação (SR)

Sistema	T ° C	a (%)	b	x_0 (h)	EPE	Equação de regressão	R^2
CR	15 ° C	101.10	2.52	7.51	4.06	$\hat{y} = \frac{101.1}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-7.51))}{2.52}\right)})}$	0.97
	25 ° C	102.20	6.59	12.69	3.47	$\hat{y} = \frac{102.3}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-12.69))}{6.59}\right)})}$	0.98
	35 ° C	81.80	8.51	17.07	5.67	$\hat{y} = \frac{81.8}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-17.07))}{8.51}\right)})}$	0.97
SR	15° C	34.17	14.22	27.43	2.76	$\hat{y} = \frac{34.17}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-27.43))}{14.22}\right)})}$	0.95
	25° C	37.48	10.65	20.77	1.85	$\hat{y} = \frac{37.48}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-20.77))}{10.65}\right)})}$	0.94
	35° C	101.51	5.74	12.51	2.53	$\hat{y} = \frac{101.51}{(1 + e^{\left(\frac{(-(x-12.51))}{12.51}\right)})}$	0.99

EPE – Erro padrão da estimativa.

3.2. Bioensaios de Toxicidade

Os bioensaios de toxicidade do isotiocianato de alilo (AITC) para *S. zeamais*, aplicados no sistema com recirculação de ar (CR) na dose de 49,0 μL kg^{-1}, foram conduzidos em três posições da coluna de grãos de milho (0,0 m – base; 0,5 m – região intermediária; 1,0 m – topo) e em três temperaturas de armazenamento (15, 25 e 35 °C).

Os dados de mortalidade corrigida de *S. zeamais* ajustaram-se ao modelo sigmoidal de três parâmetros, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,80 e 0,99 (Tabela 4). A mortalidade máxima teórica (a) apresentou ampla variação entre os tratamentos, com valores desde 20,27% na posição superior a 15 °C até 103,22% na base, também a 15 °C. O ponto de inflexão (X_0) variou de 8,06 h (base, 35 °C) a 24,87 h (base, 15 °C), enquanto o parâmetro de inclinação (b) oscilou entre 0,09 h (topo, 35 °C) e 5,06 h (base, 15 °C), evidenciando diferenças na velocidade de resposta entre as condições avaliadas.

Na base da coluna de grãos (Figura 3A), observou-se forte influência da temperatura sobre a dinâmica de mortalidade. A 35 °C, a curva apresentou rápida

ascensão, atingindo platô próximo a 96% em aproximadamente 11 h, com intervalo crítico (PcI–PcU) de 6,68–9,44 h (R^2 = 0,99). A 25 °C, a mortalidade aumentou de forma intermediária, estabilizando-se em torno de 97% após 25 h, com intervalo de 5,58–20,70 h (R^2 = 0,98). Já a 15 °C, a resposta foi mais lenta, alcançando platô próximo a 100% apenas após 40 h, com intervalo crítico ampliado de 14,75–34,99 h (R^2 = 0,98).

Na posição intermediária (0,5 m; Figura 3B), padrão semelhante foi observado. A 35 °C, a mortalidade atingiu rapidamente valores próximos a 98% em cerca de 12 h, com intervalo crítico de 7,87–8,91 h (R^2 = 0,99). A 25 °C, a ascensão foi gradual, com estabilização em torno de 99% após 25 h, apresentando intervalo de 9,28–22,72 h (R^2 = 0,99). Em contraste, a 15 °C, o platô foi limitado, com mortalidade máxima de aproximadamente 63%, mesmo após 50 h de exposição, e intervalo crítico de 17,83–28,35 h (R^2 = 0,99).

Na região superior da coluna (1,0 m; Figura 3C), a 15 °C, a mortalidade permaneceu baixa, atingindo cerca de 20% mesmo após 50 h de exposição. Por outro lado, a 25 °C e 35 °C, observaram-se elevados níveis de mortalidade (93–97%), com intervalos críticos de 8,94–24,98 h (R^2 = 0,99) e 8,45–8,81 h (R^2 = 0,99), respectivamente. No sistema sem recirculação de ar (SR), a resposta foi observada apenas na região superior da coluna de grãos a 15 °C, com mortalidade máxima de 98,27% e ajuste satisfatório do modelo (R^2 = 0,89) (Tabela 4 e Figura 3C).

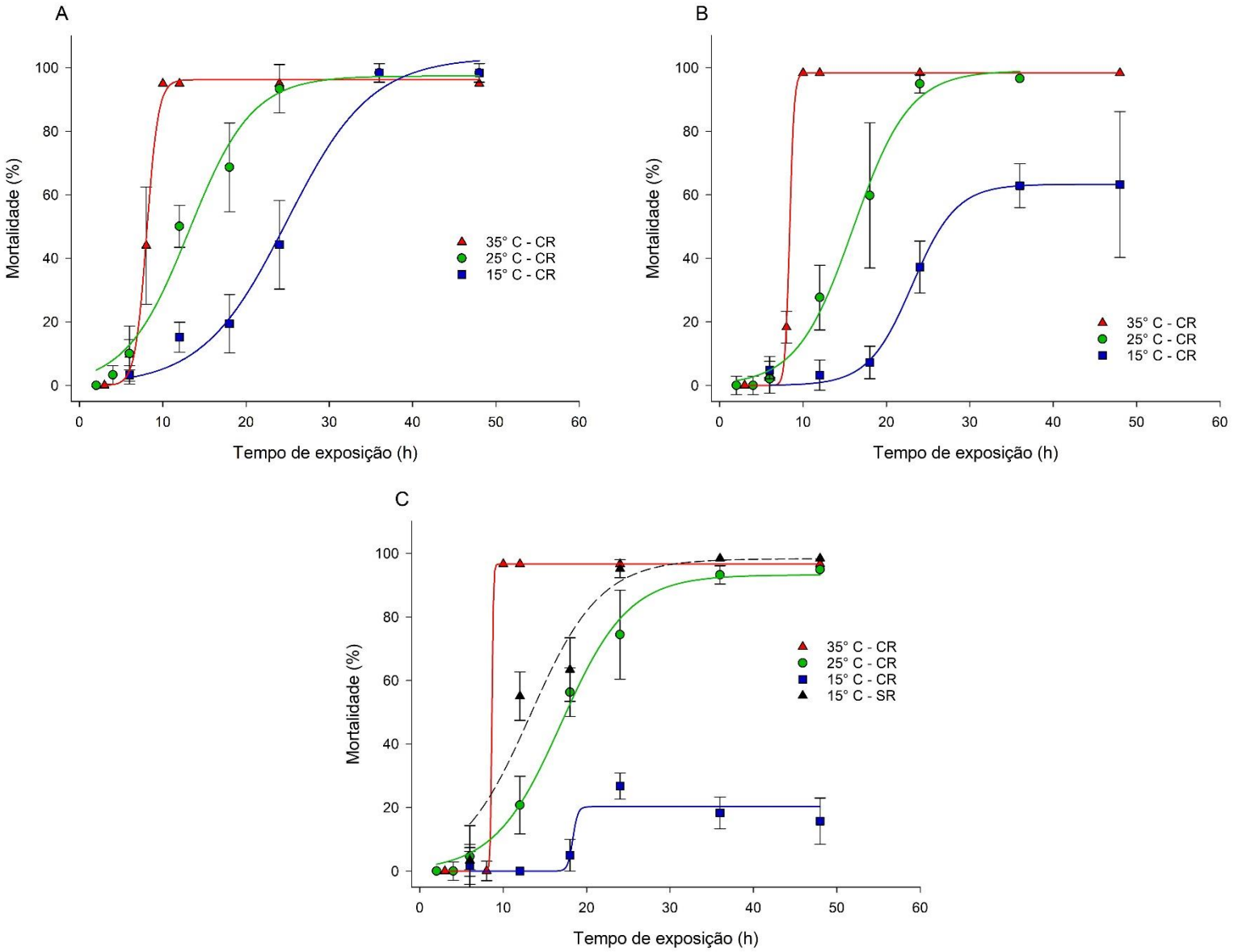
Tabela 4: Intervalos Críticos de mortalidade (PcI e PcU) de *S. zeamais* nos sistemas com recirculação (CR) e sem recurculação (SR), em três temperaturas de armazenamento, nas alturas 0,0 m (A), 0,5 m (B) e 1,0 m (C) da coluna de grãos de milho

Altura (m)	T (°C)	a	x_0 (h)	b (h)	PcI (h)	PcU (h)	R^2
0,0 - CR	15	103.22	24.87	5.06	14.75	34.99	0.98
	25	97.37	13.14	3.78	5.58	20.70	0.98
	35	96.20	8.06	0.69	6.68	9.44	0.99
0,5- CR	15	63.29	23.09	2.63	17.83	28.35	0.99
	25	99.00	16.00	3.36	9.28	22.72	0.99
	35	98.37	8.39	0.26	7.87	8.91	0.998
1,0- CR	15	20.27	18.33	0.30	17.73	18.93	0.80
	25	93.19	16.96	4.01	8.94	24.98	0.99

	35	96.63	8.63	0.09	8.45	8.81	0.99
1,0 - SR	15	98.27	13.24	4.20	4.84	21.64	0.89

PcI e PcU: Ponto crítico inferior e ponto crítico superior, respectivamente.

Figura 3: Mortalidade de *S. zeamais* nos sistemas com recirculação (CR) e sem recurculação (SR) em três temperaturas de armazenamento, nas alturas 0,0 m (A), 0,5 m (B) e 1,0 m (C) da coluna de grãos de milho



Para *T. castaneum*, os ajustes ao modelo sigmoidal de três parâmetros no sistema com recirculação de AITC (CR) apresentaram elevada adequação, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,838 e 0,996 (Tabela 5; Figura 4). Os parâmetros estimados foram, em sua maioria, significativos ($p < 0,01$), indicando bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

As curvas de mortalidade (Figura 4) evidenciaram forte influência da temperatura, com resposta globalmente mais lenta em comparação a *S. zeamais*. A 35 °C, a mortalidade aumentou rapidamente em todas as posições da coluna de grãos, com intervalos críticos (PcI–PcU) bastante reduzidos, variando entre 0,6 e 2,9 h. Com a redução da temperatura, observou-se ampliação progressiva desses intervalos: entre 7,1 e 8,6 h a 25 °C e entre 8,7 e 24,7 h a 15 °C, dependendo da posição na coluna de grãos (Tabela 5).

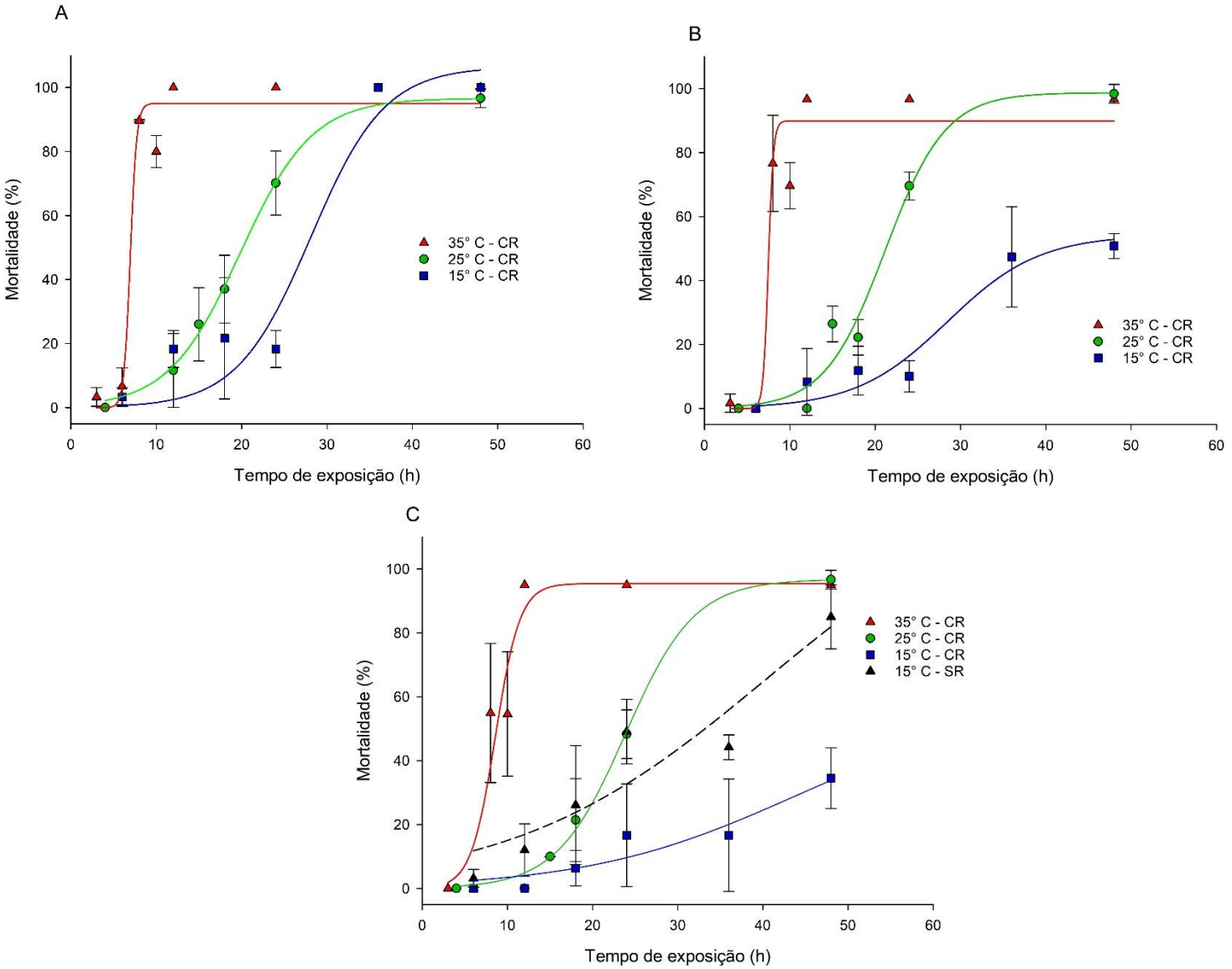
No sistema sem recirculação (SR), a mortalidade corrigida foi observada apenas na região superior da coluna (1,0 m), com intervalo crítico de 29,7 h a 15 °C. Nas posições intermediária (0,5 m) e basal (0,0 m), os valores de mortalidade permaneceram baixos (< 5%), independentemente do tempo de exposição e da temperatura. Esse comportamento foi semelhante ao observado para *S. zeamais*, evidenciando que, na ausência de recirculação, a eficiência do AITC é limitada pela baixa difusão ao longo da massa de grãos, independentemente da espécie avaliada.

Tabela 5: Intervalos críticos de mortalidade (PcI e PcU) de *T. castaneum* nos sistemas com recirculação (CR) e sem recirculação (SR) de AITC, em três temperaturas de armazenamento, nas alturas 0,0 m (A), 0,5 m (B) e 1,0 m (C) da coluna de grãos de milho

Altura (m)	T (°C)	a	x_0 (h)	b (h)	PcI (h)	PcU (h)	R^2
0,0	15	106.53	28.10	4.33	23.77	32.43	0.891
	25	96.61	19.83	4.22	15.61	24.05	0.996
	35	95.04	6.96	0.37	6.59	7.33	0.960
0,5	15	54.30	28.47	5.40	23.07	33.87	0.915
	25	98.69	21.15	3.53	17.62	24.68	0.951
	35	89.89	7.47	0.29	7.18	7.76	0.927
1,0	15	57.92	43.83	12.33	31.50	56.16	0.838
	25	96.62	23.85	4.04	19.81	27.89	0.991
	35	95.42	8.58	1.43	7.15	10.01	0.896
1,0 - SR	15	130.97	40.36	14.86	25.50	55.22	0.802

PcI e PcU: Ponto crítico inferior e ponto crítico superior, respectivamente.

Figura 4: Mortalidade de *T. castaneum* no sistema CR e SR de AITC nos sistemas com recirculação (CR) e sem recirculação (SR) de AITC, em três temperaturas de armazenamento, nas alturas 0,0 m (A), 0,5 m (B) e 1,0 m (C) da coluna de grãos de milho



3.3.Taxa instantânea de crescimento populacional (r_i)

Para *S. zeamais*, observou-se forte influência da temperatura. A 35 °C, no sistema com recirculação (CR), o declínio de r_i foi rápido, atingindo valores próximos de zero em menos de 10 h de exposição. A 25 °C, a redução foi mais gradual, com estabilização após aproximadamente 20–25 h, enquanto a 15 °C o declínio foi mais lento, mantendo valores positivos de r_i até cerca de 35–40 h. No sistema sem recirculação (SR), os valores de r_i permaneceram mais elevados por maior período, mesmo a 35 °C, evidenciando atraso no declínio e confirmando a menor difusão do fumigante na ausência de recirculação (Figura 5A).

Na posição intermediária da coluna de grãos (Figura 5B), observou-se comportamento semelhante, porém com declínio ligeiramente mais lento no sistema CR. A 35 °C, r_i reduziu-se rapidamente em torno de 12 h, enquanto a 25 °C e 15 °C apresentaram reduções progressivas, com estabilização apenas após 25–30 h. No sistema SR, os valores de r_i mantiveram-se elevados, especialmente a 15 °C, onde o crescimento populacional permaneceu positivo até aproximadamente 50 h, reforçando a baixa penetração do fumigante.

Na posição superior da coluna (1,0 m; Figura 5C), o sistema CR apresentou elevada eficácia a 25 °C e 35 °C, com reduções acentuadas de r_i em 10–15 h. Entretanto, a 15 °C, o declínio foi menos acentuado., indicando que o crescimento populacional não foi completamente suprimido. No sistema SR, a 15 °C, os valores de r_i permaneceram elevados nas posições basal e intermediária do protótipo, com valores superiores a 0,010.

Para *T. castaneum*, os ajustes da taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) evidenciaram padrões de resposta dependentes da temperatura, da posição na coluna de grãos e do sistema de aplicação do fumigante. Na base da coluna (Figura 6A), o sistema com recirculação (CR) promoveu reduções rápidas de r_i em temperaturas mais elevadas. A 35 °C, o declínio foi acentuado, atingindo valores próximos de zero em menos de 10 h de exposição. A 25 °C, a redução ocorreu de forma intermediária, com estabilização após cerca de 20 h, enquanto a 15 °C o declínio foi mais lento, mantendo valores positivos até aproximadamente 30–35 h. No sistema sem recirculação (SR), os valores de r_i permaneceram mais elevados por maior período, mesmo a 35 °C, confirmando atraso no declínio e menor difusão do fumigante.

Na posição intermediária a 0,5 m (Figura 6B), observou-se comportamento semelhante, porém com declínio ligeiramente mais lento no sistema CR. A 35 °C, r_i reduziu-se rapidamente em torno de 12 h, enquanto a 25 °C apresentou redução gradual, com estabilização após aproximadamente 25 h. A 15 °C, o declínio foi incompleto, mantendo valores positivos até cerca de 40 h. No sistema SR, os valores de r_i mantiveram-se elevados em todas as temperaturas, especialmente a 15 °C, onde o crescimento populacional permaneceu positivo durante todo o período de exposição.

Na posição superior da coluna a 1,0 m (Figura 6C), o sistema CR apresentou elevada eficácia a 25 °C e 35 °C, com reduções acentuadas de r_i em 10–15 h. Entretanto, a 15 °C, de maneira similar que para *S. zeamais*, o crescimento populacional não foi completamente suprimido, mesmo após 48 h de exposição.

Figura 5: Taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) *S. zeamais* em testes de exposição ao AITC a 35° C no sistema CR e SR nas alturas de 0,0m (A), 0,5 m (B) e 1,0 m (C) na coluna de grãos

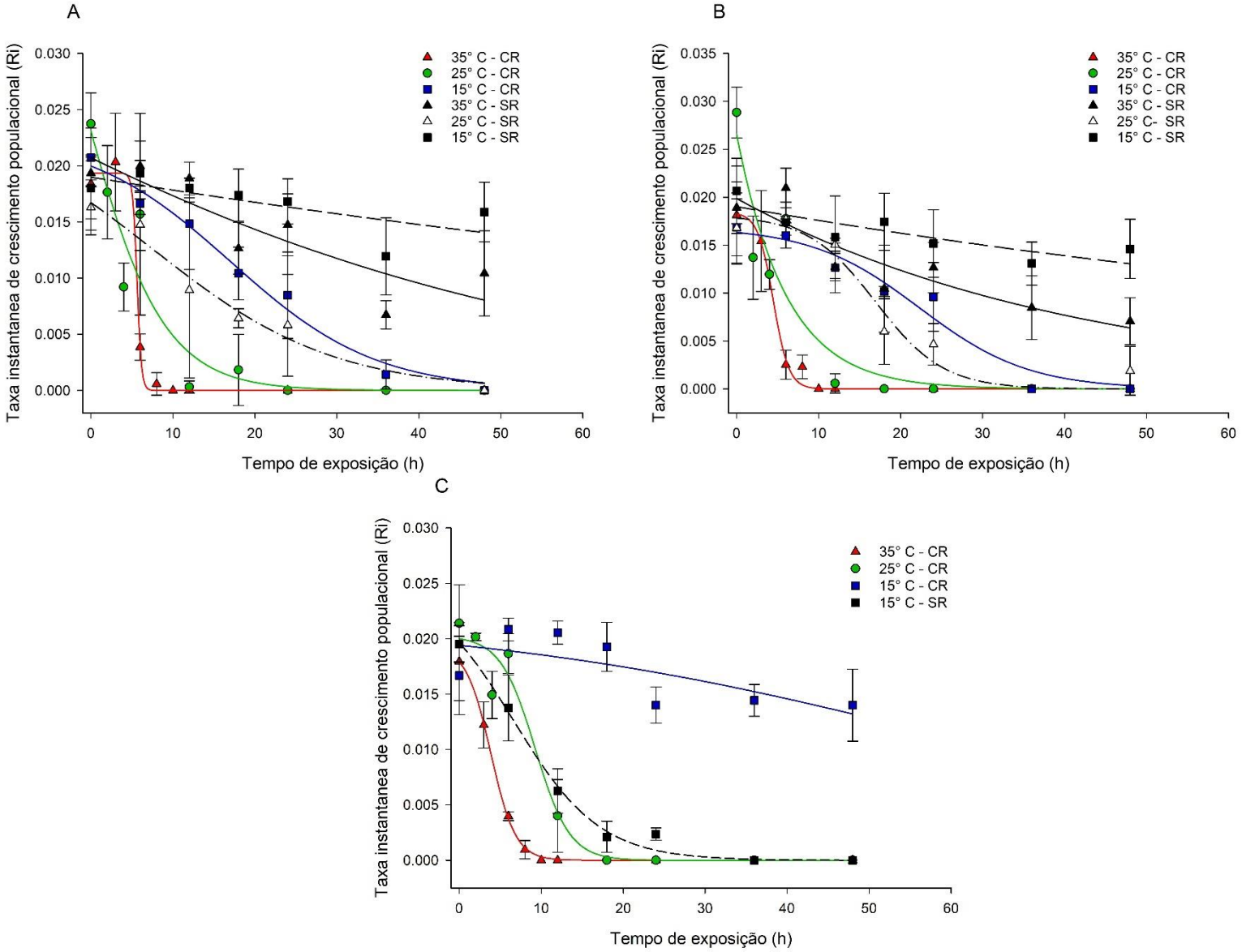
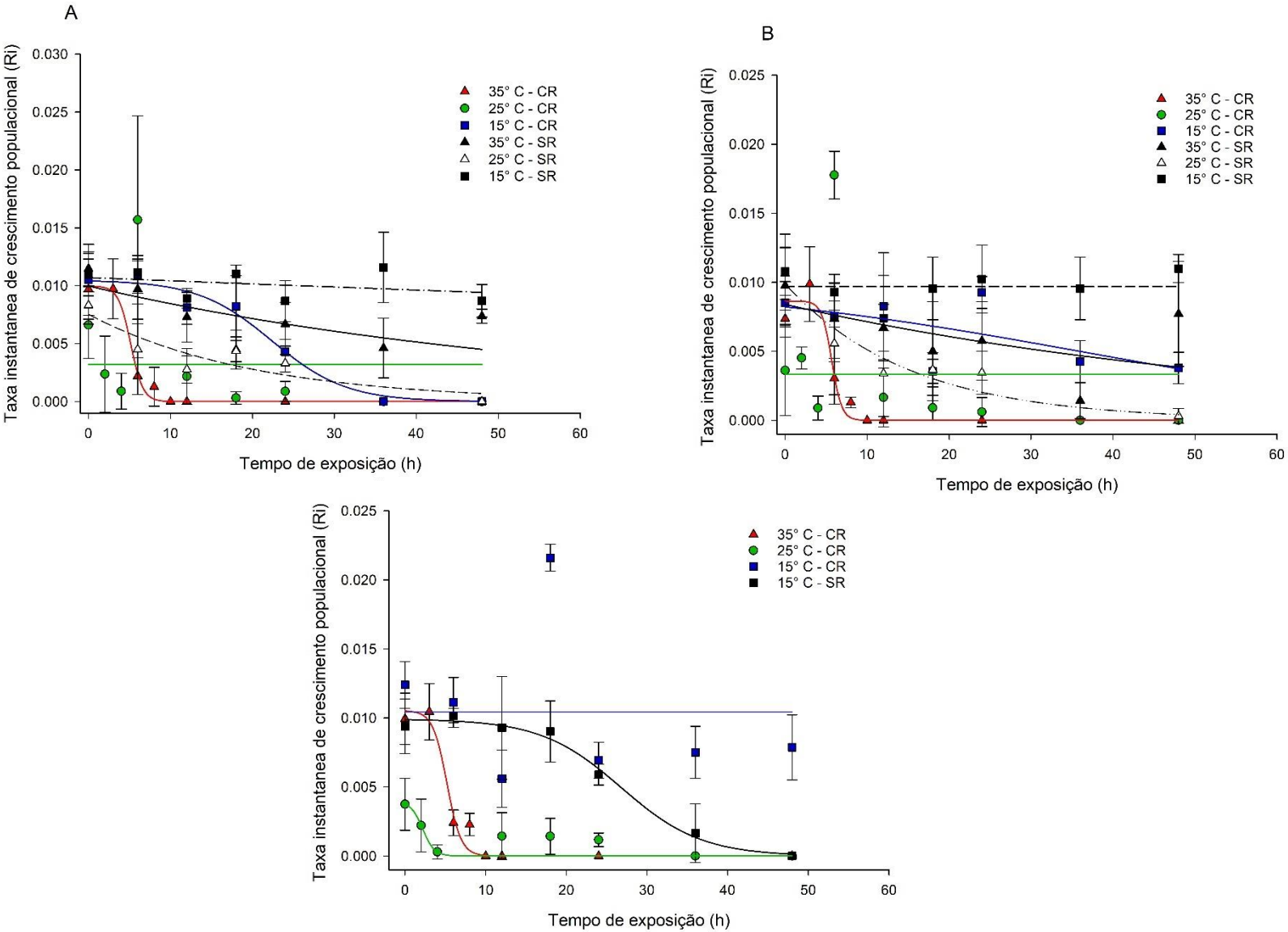


Figura 6: Taxa instantânea de crescimento populacional (r_i) *T. castaneum* em testes de exposição ao AITC a 35° C no sistema CR e SR nas alturas de 0,0m (A), 0,5 m (B) e 1,0 m C) na coluna de grãos



3.4. Qualidade física dos grãos expostos ao AITC nas diferentes Temperaturas

As variáveis de qualidade dos grãos de milho — teor de água, condutividade elétrica e atributos de cor (L*, a*, b*) — foram avaliadas após a exposição ao isotiocianato de alilo (AITC) em diferentes tempos, temperaturas e sistemas de aplicação (com e sem recirculação de ar) (Tabelas 6-11). De modo geral, a qualidade dos grãos foi pouco afetada pelo tratamento com AITC, sendo observadas alterações significativas apenas para o teor de água, dependendo das condições experimentais.

O teor de água apresentou redução significativa ($p < 0,05$) ao longo do tempo de exposição, especialmente no sistema com recirculação de ar (CR) sob temperatura de 35 °C. Nessas condições, observou-se diminuição do teor de água em função do tempo, evidenciando maior perda de umidade associada à combinação de temperatura elevada e fluxo contínuo de ar no sistema. Em temperaturas menores (15 °C e 25 °C), as variações no teor de água foram menos pronunciadas, independentemente do sistema de aplicação.

Para a condutividade elétrica, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), tanto em função do tempo de exposição e da temperatura, nos diferentes sistemas de aplicação do AITC. Os valores permaneceram estáveis ao longo do tempo de exposição, indicando ausência de alterações relevantes na integridade das membranas celulares dos grãos.

De forma semelhante, os atributos de cor (L*, a* e b*) não apresentaram variações significativas ($p > 0,05$) entre os tratamentos avaliados. Os valores mantiveram-se constantes ao longo dos tempos de exposição, independentemente do tempo de exposição e da temperatura, nos diferentes sistemas de aplicação do AITC, indicando preservação dessas características físicas dos grãos.

De maneira geral, os resultados demonstram que a aplicação de AITC, nas condições avaliadas, não comprometeu a qualidade física dos grãos de milho, com exceção da redução do teor de água observada em condições de maior temperatura associadas à recirculação de ar.

Tabela 6: Teor de água (%, b.u.), condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}), L* (luminosidade), tonalidade de cor (h*) e saturação de cor (C*) em grão de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema com recirculação (CR) em diferentes combinações de temperatura e tempo de exposição na base (0,0 m) da coluna de grãos

Temperatura (ºC)	**Tempo de exposição (h)**					
	0	6	12	18	24	48
	Teor de água (%, b.u.)					
15	12,5±0,2aA	12,6±0,1aA	12,4±0,5aA	12,8±0,2aA	12,5±0,1aA	12,1±0,2a
25	12,5±0,2aA	12,0±0,2abA	12,3±0,2aA	11,2±0,1bB	11,4±0,1bB	11,9±0,1b
35	12,5±0,2aA	11,4±0,7bB	11,7±0,7abB	11,2±0,3bB	12,3±0,8aA	11,2±0,2b
	Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1})					
15	8,1±0,1	8,6±1,6	8,2±0,9	8,0±0,7	7,2±0,7	8,6±0,6
25	8,1±0,1	8,0±0,1	8,0±3,3	8,2±1,6	8,7±1,7	9,4±0,9
35	8,1±0,1	8,1±0,1	8,8±2,3	9,7±1,8	10,7±1,0	12,5±0,6
	L*					
15	63,8±4,0	63,1±0,4	58,1±3,4	63,0±0,3	64,5±6,4	63,0±0,3
25	63,8±4,0	65,9±7,4	63,5±4,5	67,9±6,7	60,9±4,4	68,2±2,9
35	63,8±4,0	63,6±6,5	62,8±7,0	63,2±6,4	63,2±6,6	62,3±6,1
	h*					
15	79,4±1,1	77,3±0,6	79,5±1,5	78,5±0,5	79,0±1,0	78,1±3,9
25	79,4±1,1	81,8±3,2	79,2±2,5	79,6±5,5	76,8±2,7	80,5±2,0
35	79,4±1,1	80,2±3,9	80,2±4,3	80,1±4,4	80,4±4,0	80,3±3,7
	C*					
15	28,2±2,8	27,4±0,2	27,6±0,1	27,0±1,5	27,9±0,6	28,0±1,4
25	28,2±2,8	29,9±2,1	29,2±4,6	28,9±3,7	28,6±3,1	27,4±2,9
35	28,2±2,8	30,1±4,7	30,5±5,3	30,2±4,5	29,6±4,6	30,5±3,2

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna ou minúscula na linha não diferem estatísticamente (p>0,05) de acordo com o Teste de Tukey.

Tabela 7: Teor de água (%, b.u.), condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}), L* (luminosidade), tonalidade de cor (h*) e saturação de cor (C*) em grão de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema com recirculação (CR) em diferentes combinações de temperatura e tempo de exposição a 0,5 m da base da coluna de grãos

Temperatura (ºC)	**Tempo de exposição (h)**					
	0	6	12	18	24	48
	Teor de água (%, b.u.)					
15	12,5±0,2aA	12,3±0,8aA	12,7±0,4aA	12,8±0,8aA	12,8±0,5aA	12,5±0,3aA
25	12,5±0,2aA	12,1±0,1aA	12,4±0,2aA	11,3±0,1bB	11,4±0,1bB	12,0±0,2abAB
35	12,5±0,2aA	11,6±0,6bA	11,1±0,1bB	11,3±0,2bB	11,7±0,8abB	11,4±0,1bB
	Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1})					
15	8,1±0,1	8,5±0,9	8,5±1,9	8,7±0,8	8,3±1,6	8,5±2,0
25	8,1±0,1	8,3±2,2	8,4±1,6	7,4±0,3	7,8±1,6	10,9±1,7
35	8,1±0,1	10,0±1,1	8,2±1,8	10,5±0,6	10,8±1,7	10,3±3,4
	L*					
15	63,8±4,0	62,2±1,7	58,3±5,6	61,1±4,1	61,4±8,9	63,0±0,1
25	63,8±4,0	64,6±3,0	62,6±4,5	63,4±3,7	62,2±4,7	65,3±6,9
35	63,8±4,0	62,3±8,7	62,5±9,1	62,3±8,5	62,4±8,5	62,4±8,5
	h*					
15	79,4±1,1	79,4±0,4	79,4±0,4	80,1±1,7	79,0±1,3	79,5±0,6
25	79,4±1,1	77,3±2,3	80,5±4,7	78,6±5,0	79,2±4,2	79,9±5,7
35	79,4±1,1	79,1±3,4	78,9±3,5	79,0±3,3	79,3±3,2	79,2±3,0
	C*					
15	28,2±2,8	27,4±0,1	27,0±0,1	28,3±1,5	28,0±0,9	27,5±0,1
25	28,2±2,8	24,1±1,6	27,8±4,7	23,8±1,9	28,6±5,8	29,0±5,7
35	28,2±2,8	28,1±4,5	27,6±4,5	27,9±3,7	28,1±3,1	28,2±4,6

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna ou minúscula na linha não diferem estatísticamente (p>0,05) de acordo com o Teste de Tukey.

Tabela 8: Teor de água (%, b.u.), condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}), L* (luminosidade), tonalidade de cor (h*) e saturação de cor (C*) em grão de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema com recirculação (CR) em diferentes combinações de temperatura e tempo de exposição a 1,0 m da base da coluna de grãos

Temperatura (ºC)	**Tempo de exposição (h)**					
	0	6	12	18	24	48
	Teor de água (%, b.u.)					
15	12,5±0,2aA	13,1±0,4aA	13,0±0,7aA	13,1±0,5aA	12,9±0,5aA	12,5±0,6aA
25	12,5±0,2aA	11,9±0,2aB	12,5±0,1aA	11,6±0,2aB	11,8±0,1aB	11,7±0,1aA
35	12,5±0,2aA	11,7±0,1abB	11,5±0,5bB	11,5±0,3bB	11,4±0,1bB	12,0±0,6abA
	Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1})					
15	8,1±0,1	7,4±0,5	7,8±1,8	7,9±1,1	8,3±1,1	9,3±1,4
25	8,1±0,1	8,6±0,5	9,3±2,7	8,3±2,3	9,1±1,6	10,2±2,8
35	8,1±0,1	8,8±2,4	11,2±1,7	11,1±1,3	11,8±1,1	12,4±1,5
	L*					
15	63,8±4,0	64,3±8,6	64,6±6,1	68,1±5,7	68,6±2,1	31,1±0,3
25	63,8±4,0	68,8±6,0	68,8±3,9	62,6±8,0	62,5±1,2	63,9±3,8
35	63,8±4,0	65,8±7,3	65,8±7,3	65,9±7,2	66,0±7,5	66,2±5,7
	h*					
15	79,4±1,1	79,4±0,4	79,5±0,7	78,5±1,3	77,6±3,4	79,6±0,5
25	79,4±1,1	79,7±4,9	79,5±4,0	79,2±5,4	80,1±3,9	79,5±1,9
35	79,4±1,1	81,0±4,3	81,1±4,4	80,7±3,5	81,8±4,3	80,4±5,3
	C*					
15	28,2±2,8	27,5±0,9	28,0±2,5	27,9±3,5	28,9±1,8	27,5±0,2
25	28,2±2,8	27,8±2,1	29,0±0,9	28,5±3,2	27,3±5,1	30,1±4,5
35	28,2±2,8	30,1±4,3	28,7±3,7	30,2±1,0	30,4±4,6	28,5±3,2

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna ou minúscula na linha não diferem estatísticamente ($p>0,05$) de acordo com o Teste de Tukey.

Tabela 9: Teor de água (%, b.u.), condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}), L* (luminosidade), tonalidade de cor (h*) e saturação de cor (C*) em grão de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem recirculação (SR) em diferentes combinações de temperatura e tempo de exposição na base (0,0 m) da coluna de grãos

Temperatura (ºC)	**Tempo de exposição (h)**					
	0	6	12	18	24	48
	Teor de água (%, b.u.)					
15	12,5±0,2	11,8±0,4	12,1±0,1	12,2±0,3	12,1±0,1	11,9±0,6
25	12,5±0,2	12,0±0,1	12,8±0,5	12,7±0,5	12,0±0,2	12,5±0,4
35	12,5±0,2	12,0±0,2	12,5±0,6	12,1±0,2	12,2±0,2	12,4±0,5
	Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1})					
15	8,1±0,1	9,4±0,7	8,8±0,3	8,6±0,5	7,9±0,7	8,3±1,1
25	8,1±0,1	7,8±1,5	8,2±1,7	8,6±0,5	8,1±1,3	9,2±0,8
35	8,1±0,1	8,5±0,8	7,7±1,0	7,3±0,7	7,7±0,8	8,8±0,7
	L*					
15	63,8±4,0	63,0±0,5	61,7±1,7	64,7±3,2	63,3±5,2	62,5±1,7
25	63,8±4,0	59,2±3,0	61,4±5,2	64,0±6,0	62,3±4,4	66,2±6,3
35	63,8±4,0	64,3±6,1	62,7±5,3	63,5±6,2	61,4±1,7	64,5±5,5
	h*					
15	79,4±1,1	79,5±0,4	79,7±0,7	79,0±3,0	79,6±1,8	81,5±3,0
25	79,4±1,1	79,9±2,9	77,7±3,6	80,4±3,1	78,4±2,0	79,8±5,1
35	79,4±1,1	80,4±3,2	80,3±1,8	80,4±3,7	80,0±5,1	79,9±3,4
	C*					
15	28,2±2,8	27,9±0,4	26,9±1,7	28,1±1,3	27,0±0,9	27,0±1,1
25	28,2±2,8	25,8±3,9	24,7±4,2	25,4±2,4	27,5±3,5	25,5±4,0
35	28,2±2,8	29,0±3,5	27,3±4,7	26,5±1,0	29,5±3,1	29,6±4,2

Tabela 10: Teor de água (%, b.u.), condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}), L* (luminosidade), tonalidade de cor (h*) e saturação de cor (C*) em grão de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem recirculação (SR) em diferentes combinações de temperatura e tempo de exposição a 0,5 m da base da coluna de grãos

Temperatura (ºC)	**Tempo de exposição (h)**					
	0	6	12	18	24	48
	Teor de água (%, b.u.)					
15	12,5±0,2	11,8±0,4	11,8±0,3	12,0±0,2	11,8±0,2	12,0±0,2
25	12,5±0,2	12,1±0,1	12,2±0,5	12,4±0,4	12,2±0,1	12,5±0,5
35	12,5±0,2	12,3±0,5	12,5±0,4	12,3±0,1	12,6±0,5	12,2±0,3
	Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1})					
15	8,1±0,1	8,1±0,2	8,4±2,0	8,2±1,2	8,2±0,2	8,5±1,2
25	8,1±0,1	8,5±0,8	7,7±1,0	7,3±0,7	7,4±0,6	8,7±0,6
35	8,1±0,1	7,6±0,8	6,5±0,6	7,7±0,8	7,5±0,6	8,1±1,7
	L*					
15	63,8±4,0	63,0±0,2	63,9±1,7	63,1±0,2	63,0±0,5	62,5±0,9
25	63,8±4,0	60,7±1,5	64,4±6,4	62,4±3,4	65,3±5,3	64,3±7,3
35	63,8±4,0	64,4±3,2	62,8±1,3	65,7±3,1	64,0±1,8	62,7±3,7
	h*					
15	79,4±1,1	79,0±0,6	79,9±1,0	78,2±0,8	79,5±0,3	79,3±1,7
25	79,4±1,1	79,8±1,8	77,6±3,6	78,0±2,8	78,5±1,3	76,8±5,1
35	79,4±1,1	80,2±3,2	80,0±1,3	79,9±2,0	80,1±1,0	79,7±0,6
	C*					
15	28,2±2,8	27,5±0,1	27,8±0,3	27,6±1,0	28,0±1,3	26,9±0,6
25	28,2±2,8	26,3±2,6	24,4±4,1	27,9±3,3	30,7±1,0	25,9±2,6
35	28,2±2,8	29,2±5,9	27,8±3,0	28,6±2,0	29,1±1,2	27,3±3,0

Tabela11: Teor de água (%, b.u.), condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1}), L* (luminosidade), tonalidade de cor (h*) e saturação de cor (C*) em grão de milho expostos a dose de 49,0 µL kg^{-1} de AITC aplicado em sistema sem recirculação (SR) em diferentes combinações de temperatura e tempo de exposição a 1,0 m da base da coluna de grãos

Temperatura (ºC)	**Tempo de exposição (h)**					
	0	6	12	18	24	48
	Teor de água (%, b.u.)					
15	12,5±0,2	12,6±0,2	12,5±0,1	12,6±0,2	12,0±0,1	12,4±0,4
25	12,5±0,2	12,2±0,1	12,1±0,1	12,3±0,1	12,5±0,4	12,5±0,4
35	12,5±0,2	12,8±0,4	12,1±0,3	12,3±0,1	12,6±0,4	12,6±0,3
	Condutividade elétrica (µS cm^{-1} g^{-1})					
15	8,1±0,1	8,3±0,4	8,7±0,8	9,2±0,7	8,5±0,8	9,7±1,1
25	8,1±0,1	8,7±1,4	9,2±2,3	9,4±0,9	8,4±1,2	9,4±2,0
35	8,1±0,1	7,7±1,2	7,7±1,0	8,3±0,8	7,7±1,0	9,4±1,5
	L*					
15	63,8±4,0	63,1±0,7	63,2±2,1	62,9±0,5	63,4±1,0	63,0±1,3
25	63,8±4,0	57,6±4,2	58,8±5,9	64,5±8,8	59,3±2,6	64,9±5,3
35	63,8±4,0	64,0±2,0	64,3±1,7	63,7±3,3	63,9±2,7	64,1±1,0
	h*					
15	79,4±1,1	79,5±0,9	80,1±2,3	77,3±3,0	79,0±2,5	78,3±1,3
25	79,4±1,1	80,1±1,4	78,4±4,1	82,1±3,8	77,4±1,8	78,1±3,9
35	79,4±1,1	80,3±3,1	79,9±2,3	78,5±0,9	80,4±5,6	80,0±2,0
	C*					
15	28,2±2,8	27,9±1,9	26,7±3,7	27,5±1,3	27,3±0,3	27,0±4,3
25	28,2±2,8	25,4±2,8	25,8±2,7	25,1±2,2	28,4±3,7	25,4±5,2
35	28,2±2,8	27,6±3,5	27,0±2,8	28,3±5,7	29,1±3,1	28,0±1,0

4. DISCUSSÃO

O isotiocianato de alilo (AITC), principal composto volátil dos óleos essenciais de *Brassica* spp., surge como alternativa promissora ao controle químico convencional de pragas em grãos armazenados, especialmente diante do avanço da resistência à fosfina (PH_3). Estudos recentes confirmam sua eficácia contra populações resistentes: Shah et al. (2025) reportaram $CL_{99,9}$ de 2,59 μL L^{-1} para cinco pragas principais, incluindo *S. oryzae* e *T. castaneum*, sem evidência de resistência cruzada. De forma complementar, Paes et al. (2016) demonstraram a eficácia do AITC sobre populações de *S. zeamais* resistentes à fosfina.

Apesar desse potencial, o principal desafio à aplicação do AITC em sistemas de armazenamento de grãos está associado ao seu baixo coeficiente de difusão em comparação à fosfina. Paes et al. (2012) registraram mortalidade superior a 90% em *T. castaneum* resistente, destacando a necessidade de recirculação forçada para superar essa limitação. Nesse contexto, Ceron et al. (2023) evidenciaram que a recirculação é determinante para alcançar mortalidade uniforme maior que 95% em um período de exposição de 48 h. ao longo da coluna de grãos, resultado que é corroborado pelo presente estudo, o qual demonstra ainda a modulação térmica da dinâmica do AITC no sistema com recirculação (CR).

A volatilização do AITC apresentou clara dependência da temperatura, conforme descrito pelos modelos sigmoidais ajustados. No sistema com recirculação (CR), observou-se variação nos parâmetros cinéticos da volatilização em função da temperatura, refletindo mudanças na velocidade e na dinâmica de liberação do composto. No sistema sem recirculação (SR), a volatilização foi fortemente limitada em temperaturas mais baixas, restringindo-se a aproximadamente 34% a 15 °C mesmo após 48 h, enquanto a 35 °C atingiu valores próximos de 100% em menor intervalo de tempo. Esses resultados evidenciam que o incremento térmico intensifica a taxa de volatilização e favorece a distribuição do AITC, especialmente quando associado à recirculação de ar.

Esse comportamento térmico é consistente com padrões descritos para fumigantes gasosos em insetos de produtos armazenados. Nayak et al. (2008) demonstraram que temperaturas inferiores a 15 °C exigem doses significativamente maiores de fosfina para atingir mortalidade total, devido à redução da atividade metabólica dos insetos. Em contraste, temperaturas superiores a 25 °C promovem aceleração na mortalidade, reduzindo o tempo necessário para controle efetivo. Para compostos voláteis como o AITC, Sayed et al. (2023)

atribuem essa maior suscetibilidade em temperaturas elevadas ao aumento da taxa respiratória, que intensifica a absorção do composto tóxico.

Esse mecanismo é reforçado por Athanassiou e Arthur (2020), que demonstraram que a dinâmica de variação térmica influencia diretamente a sobrevivência de insetos de grãos armazenados. Adicionalmente, Wang et al. (2018) evidenciaram, em *T. castaneum*, o aumento da respiração mitocondrial com a elevação da temperatura, via ativação do ciclo de Krebs, o que contribui para maior captação de fumigantes. Nesse contexto, Shah et al. (2025) também destacaram que a ventilação forçada reduz gradientes de concentração do AITC, promovendo distribuição mais homogênea do composto, o que está de acordo com a vazão adotada neste estudo (0,46 $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$).

No presente estudo, a elevação da temperatura ampliou significativamente a letalidade do AITC no sistema com recirculação, refletida na redução dos intervalos críticos de mortalidade (PcI–PcU). Para *S. zeamais*, esse intervalo foi reduzido de aproximadamente 21 h a 15 °C para cerca de 3,35 h a 35 °C na base da coluna de grãos. De forma semelhante, *T. castaneum* apresentou redução de 19–25 h a 15 °C para 3–7 h a 35 °C, associada a curvas sigmoidais mais íngremes. Esse comportamento evidencia a sinergia entre temperatura e volatilização do AITC, conforme observado por Agrafioti et al. (2020), que relataram aumento da difusividade de compostos voláteis em sistemas aerados.

Esse padrão também está alinhado ao comportamento fisiológico de insetos poiquilotérmicos, nos quais o aumento da temperatura eleva a taxa metabólica e respiratória, favorecendo a absorção de fumigantes. Aguiar et al. (2010) demonstraram que incrementos de 10 °C podem reduzir significativamente o TL_{50} para *T. castaneum*, evidenciando a interação entre temperatura e toxicidade gasosa.

Segundo Fields (1992), as faixas ótimas de desenvolvimento de *S. zeamais* (25–32 °C) e *T. castaneum* (32–37 °C) coincidem com as condições avaliadas neste estudo, o que explica a maior eficiência do AITC em temperaturas elevadas. No sistema com recirculação, essa condição favoreceu mortalidade uniforme ao longo da coluna de grãos maior a 95% em menos de 32 h, conforme também observado em estudos anteriores. Em contraste, no sistema sem recirculação, a eficiência foi limitada, com mortalidade restrita à camada superior, especialmente a 15 °C, evidenciando que a limitação do sistema está associada à baixa difusão do composto, independentemente da espécie avaliada.

A maior tolerância de *T. castaneum* em relação a *S. zeamais* pode ser atribuída à sua plasticidade térmica. Kang et al. (2020) demonstraram que a aclimatação gradual a temperaturas elevadas reduz a mortalidade dessa espécie sob estresse térmico, evidenciando sua capacidade adaptativa. Ainda assim, os resultados indicam que a combinação de recirculação e temperatura elevada é suficiente para superar essa tolerância, promovendo controle eficaz e uniforme.

No que se refere à qualidade dos grãos, os resultados indicaram que a aplicação do AITC, mesmo sob diferentes condições de temperaturas e tempos de exposição, não comprometeu de forma expressiva os atributos físicos avaliados, com exceção do teor de água. A redução observada nessa variável, especialmente a 35 °C no sistema com recirculação, está associada à combinação de temperatura elevada, umidade relativa do ar e fluxo de ar. Em contrapartida, a estabilidade da condutividade elétrica sugere que não houve danos relevantes à integridade das membranas celulares dos grãos, enquanto a ausência de alterações nos atributos de cor (L*, a, b*) indica preservação das características visuais. Além disso, a manutenção da integridade celular, evidenciada pela condutividade elétrica, reforça que o AITC não exerce efeito fitotóxico significativo nas condições avaliadas, o que é fundamental para sua aplicação em sistemas comerciais de armazenamento.

Em trabalhos futuros, sugere-se a realização de bioensaios em fases imaturas dos insetos, bem como a avaliação em escalas maiores e em condições reais de armazenamento. Adicionalmente, estratégias como a nanoencapsulação do AITC podem contribuir para liberação controlada e redução de odores, ampliando sua aplicabilidade. Ensaios de campo em unidades armazenadoras também são necessários para validar a viabilidade econômica da tecnologia.

Em síntese, este trabalho demonstra que a aplicação do AITC associada à recirculação de ar constitui uma alternativa eficaz e sustentável ao uso de fumigantes convencionais, especialmente no manejo de populações resistentes à fosfina. A integração entre temperatura, recirculação e tempo de exposição mostrou-se determinante para maximizar a eficiência do tratamento, contribuindo para a redução de perdas pós-colheita e para o fortalecimento da cadeia produtiva de grãos em regiões tropicais.

5. CONCLUSÕES

O aumento da temperatura de armazenamento (15, 25 e 35 °C) foi determinante para a eficiência do isotiocianato de alilo (AITC), promovendo redução significativa dos intervalos críticos de mortalidade (PcI–PcU) no sistema com recirculação de ar (CR) para *S. zeamais* e *T. castaneum*. Para ambas as espécies, observou-se diminuição superior a 80% nesses intervalos entre 15 °C e 35 °C, evidenciando que a temperatura atua como fator-chave na aceleração da dinâmica de mortalidade. No sistema sem recirculação (SR), a mortalidade foi restrita à camada superior da coluna de grãos, independentemente da temperatura, confirmando que a difusão natural do AITC é insuficiente para promover controle uniforme e destacando que a recirculação de ar é essencial para a eficiência do tratamento. A aplicação de AITC em sistema com recirculação (0,46 $m^3\ min^{-1}\ t^{-1}$), associada a temperaturas iguais ou superiores a 25 °C, garantiu mortalidade superior a 95% em menos de 32 h, evidenciando elevada eficácia mesmo para espécies mais tolerantes, como *T. castaneum*, e reforçando a sinergia entre temperatura e distribuição do fumigante. A qualidade física dos grãos foi preservada após o tratamento, não sendo observadas alterações significativas na condutividade elétrica e nos parâmetros de cor (L*, a*, b*), enquanto o teor de água apresentou redução apenas sob condições de maior temperatura associadas à recirculação, sem comprometer a integridade dos grãos. Adicionalmente, o AITC não apresentou efeito residual sobre a taxa instantânea de crescimento populacional (r_i), indicando dissipação completa do composto após o período de armazenamento e reforçando sua segurança para uso em sistemas comerciais. Em conjunto, os resultados demonstram que a temperatura, aliada à recirculação de ar, é um fator determinante para maximizar a eficiência do AITC, tornando essa tecnologia uma alternativa eficaz, uniforme e operacionalmente viável ao uso de fumigantes convencionais no controle de insetos-praga em milho armazenado.

6. REFERÊNCIAS

AGRAFIOUTI, M.; ATHANASSIOU, C. G.; NAYAK, M. K. Phosphine pest management practices: disinfesting stored grain. **Journal of Stored Products Research**, v. 91, art. 101865, 2021. DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101865.

AGUIAR, R. W. S.; FARONI, L. R. D'A.; GUEDES, R. N. C.; SOUSA, A. H.; ROZADO, A. F. Toxicidade da combinação de dióxido de carbono e fosfina sob diferentes temperaturas para *Tribolium castaneum*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 881-886, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000800013.

ALENCAR, E. R. de; FARONI, L. R. D'A.; FERREIRA, L. G.; COSTA, A. R. da; PIMENTEL, M. A. G. Qualidade de milho armazenado e infestado por *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum*. **Revista Engenharia Agrícola**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 9-18, 2011.

ALVES, D. R.; ANDRADE, J. C. de A.; NOBRE, D. A. C. Natural compounds and their potential use in stored grain treatment: A review. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 1, p. 45-58, 2025.

ARTHUR, F. H.; KHAJEHALI, J. Development of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on various rice components and by-products. **Journal of Stored Products Research**, v. 83, p. 1-7, 2019. doi: 10.1016/j.jspr.2019.04.002.

ATHANASSIOU, C. G.; ARTHUR, F. H. Cool Down–Warm Up: Differential Responses of Stored Product Insects after Gradual Temperature Changes. **Insects**, v. 11, n. 3, p. 158, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/insects11030158.

CAMARGO, C. M.; FARONI, L. R. D'A.; PIMENTEL, M. A. G.; ALENCAR, E. R.; COSTA, A. R.; FERREIRA, L. G. Efeitos da temperatura de armazenamento na qualidade industrial de grãos de milho. In**: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ARMAZENAGEM DE GRÃOS**, 2014, Viçosa. Anais... Viçosa: Abrapos, 2014. p. 290-297.

CORTESE, D.; OLIVEIRA, G. S. de; FERNANDES, M. G. Influence of temperature and maize genotypes on the population dynamics of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) and grain quality during storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 111, art. 102564, 2025. DOI: 10.1016/j.jspr.2025.102564.

COLLINS, P. J.; NAYAK, M. K.; EMERY, R. N.; SCHLAGEL, R.; HOLLOWAY, J. C. Optimizing phosphine applications for insect control in stored grain. **Pest Management Science**, v. 78, n. 4, p. 1456-1467, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2024/2025: nono levantamento. Brasília, 2025.

EMBRAPA. Secagem e armazenamento de milho. In: Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Milho. Brasília, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br. Acesso em: 29 jan. 2026.

EMBRAPA. Pragas de grãos armazenados. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/colheita-e-pos-colheita/pragas-de-graos-armazenados. Acesso em: 9 dez. 2025.

FIELDS, P. G. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 28, n. 2, p. 89-118, 1992.

KANG, Y; LYU, J; WANG, P. The influence of different heating rates on mortality of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). **Grain & Oil Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 64–69, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gaost.2020.03.001

KLEIN, H. S.; LUNA, F. V. The rise of modern maize production in Brazil and Argentina. **Historia Agraria**, n. 86, p. 1-38, 2022. Disponível em: https://www.historiaagraria.com/FILE/articulos/RHA86-klein-vidal.pdf.

KOSKEI, P.; MUTURI, P.; KIMANI, E.; KIPKORIR, E.; MWANGI, J. Postharvest storage practices of maize in Rift Valley and Coastal regions of Kenya. **Journal of Stored Products Research**, v. 86, art. 101561, 2020. DOI: 10.1016/j.jspr.2020.101561.

LI, H.; ZHANG, H.; WANG, J.; LIU, Y.; ZHOU, G.; TAO, H.; GONG, J.
Resistance of stored grain pests to phosphine and its management strategies: a global review. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 23, n. 1, p. 45-62, 2023.

LOPES, L. dos S.; RAMOS, G. L. de P. A.; ALVARENGA, V. O.; CAMPAGNOLLO, F. B.; OLIVEIRA, S. B. S.; FREIRE, L.; SANT'ANA, A. S. Quantitative risk assessment of the presence of fumonisin in corn produced in different regions of Brazil: influence of climatic conditions. **Environmental Research**, v. 237, pt. 1, art. 116907, 2023. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116907.

LIMA, C. M. G.; OLIVEIRA, A. N.; PEREIRA, A. P. A.; SILVA, J. O.; FREITAS, R. S.; SANT'ANA, A. S. Influence of grains postharvest conditions on mycotoxins production and their implications in dairy products. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 41, supl. 1, e20210046, 2021. doi: 10.1590/fst.20210046.

NAYAK, M. K.; DAGLISH, G. J.; PHILLIPS, T. W.; EBERT, P. R. Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: a global perspective. **Annual Review of Entomology**, v. 65, p. 333-350, 2020. DOI: 10.1146/annurev-ento-011019-025047.

PAES, J. L.; FARONI, L. R. D'A.; MARTINS, M. A.; DHINGRA, O. D.; SILVA, T. A. Diffusion and sorption of allyl isothiocyanate in the process of fumigation of maize. Revista

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 3, p. 296-301, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000300011.

PENAGOS-TABARÉS, F.; TODOROV, A.; RAJ, J.; FARKAŠ, H.; GRUBJEŠIĆ, G. et al. Multi-mycotoxin contamination in Serbian maize during 2021–2023: climatic influence and risk assessment. **Toxins**, Basel, v. 17, n. 5, art. 227, 2025. DOI: 10.3390/toxins17050227.

PRIYADHARSHINI, V.; ANITA, B.; KUMAR, R.; SINGH, P.; KUMAR, S.; RAJ, A.; KUMAR, V.; KUMAR, N. Allyl isothiocyanate in agro-industry and food science: current trends and future prospects. **Trends in Food Science & Technology**, v. 145, art. 104378, 2025. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.104378.

REZENDE, A. C. Recirculação do gás fosfina durante o expurgo. In: XXIX Congresso Brasileiro de Armazenagem de Grãos, 2023. Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Armazenagem de Grãos, p. 27474.

ROCHA, L. O.; TANIWAKI, M. H.; ENNIS, M.; SCHREINER, L. L.; HAFFAR, F. E. Reducing fumonisin contamination in Brazilian maize: from field to storage. **Food Control**, v. 158, art. 110234, 2024.

SANTOS, S. B.; MARTINS, M. A.; FARONI, L. R. D'A.; RODRIGUES JUNIOR, V.; DHINGRA, O. D. Quality of maize grains treated with allyl isothiocyanate stored in hermetic bags. **Journal of Stored Products Research**, v. 46, n. 2, p. 111-117, 2010. DOI: 10.1016/j.jspr.2009.12.004.

SHAH, S.; JAGADEESAN, R.; NAYAK, M. K. Fumigant toxicity of allyl isothiocyanate against phosphine-resistant populations of five major stored-grain insect pests. **European Journal of Entomology**, v. 122, p. 35-41, 2025.

SCHIAVON, R. A.; PRADO, S. F.; PEINADO, M. C.; BORTOLETTO, E. C.; BORTOLUZZI, D. D'O.; PRADO, G. Efeito da temperatura de armazenamento sobre a

infestação de *Sitophilus zeamais* em grãos de milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 2, p. 150-158, 2025.

SILVA TAVEIRA, J. H. da; ROCHA, M. P.; LIMA, J. do C.; GIONGO, P. R.; SILVA, L. R. da; OLIVEIRA, T. H. de; MARCIANO, M. V.; FIGUEIREDO, L. P. Impact of storage systems on fumonisin B1 contamination in maize destined for animal feed. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 45, supl. 1, e570, 2025.

SOUZA, C. M.; SANTOS, R. F.; OLIVEIRA, M. A. Uma análise histórica da produção de milho. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 20, n. 3, p. 1-20, 2019. Disponível em: https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/5327. Acesso em: 9 mar. 2026.

VILELA, A. O.; FARONI, L. R. D'A.; GOMES, J. L.; SOUSA, A. H.; CECON, P. R. Allyl isothiocyanate as a fumigant in the cowpea and its effect on the physical properties of the grain. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 3, 2021. DOI: 10.5935/1806-6690.20210064.

WANG, L; CUI, S; LIU, Z; PING, Y; QIU, J; GENG, X. Inhibition of mitochondrial respiration under hypoxia and increased antioxidant activity after reoxygenation of *Tribolium castaneum*. **PLoS ONE**, v. 13, n. 6, p. 1–21, 2018. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199056

WALTHALL W. K., STARK J.D. "A comparison of acute mortality and population growth rate as endpoints of toxicological effect". **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 37(1):45-52. 1997.

ZHANG, H.-Y.; CHEN, X.; ZHANG, H.-Q.; LI, Y.-Y.; TIAN, X.-W.; ZHOU, G.-M.; TAO, H.-H.; GONG, J.-M. Resistance of stored grain pests to phosphine and its integrated management strategies**. Grain Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2024.

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados desta tese demonstram que a aplicação do isotiocianato de alilo (AITC) associada à recirculação de ar é uma estratégia eficaz para o controle de insetos-praga em grãos armazenados. Ao longo dos experimentos, foi possível avaliar de forma integrada o efeito do tempo de exposição, da temperatura e da posição na coluna de grãos sobre a dinâmica de mortalidade, permitindo compreender os principais fatores que condicionam a eficiência do tratamento.

No primeiro capítulo, verificou-se que a recirculação promoveu distribuição homogênea do AITC ao longo da coluna de grãos, resultando em elevada mortalidade de *S. zeamais*, *R. dominica* e *T. castaneum* em menores tempos de exposição. Em contraste, a ausência de recirculação limitou a ação do composto na cama superior, evidenciando que a difusão natural do AITC não é suficiente para garantir controle uniforme. Nessas condições, a qualidade física dos grãos foi mantida, sem alterações relevantes nos parâmetros avaliados.

No segundo capítulo, observou-se que a temperatura exerceu influência direta sobre a eficiência do AITC no controle dos insetos no milho. O aumento de 15 para 35 °C reduziu de forma expressiva os intervalos críticos de mortalidade (PcI–PcU) para as duas espécies avaliadas, indicando aceleração da resposta biológica ao tratamento. Em condições de 25 °C e 35 °C, a combinação entre temperatura e recirculação resultou em mortalidade superior a 95% em menos de 32 h, inclusive para *T. castaneum*, espécie com maior tolerância relativa.

Os resultados também indicam que a recirculação de ar é o principal fator responsável pela uniformidade do controle ao longo da coluna de grãos, enquanto a temperatura atua como moduladora da velocidade de ação do AITC. Essa interação entre variáveis operacionais e ambientais define o desempenho do sistema e deve ser considerada no dimensionamento de estratégias de manejo em armazenamento de grãos.

Em relação à qualidade, não foram observadas alterações significativas na condutividade elétrica e nos atributos de cor (L*, a*, b*) dos grãos tratados. A redução no teor de água ocorreu apenas sob condições de maior temperatura associadas à recirculação, sendo atribuída ao efeito combinado de aquecimento e fluxo de ar, sem evidência de danos estruturais aos grãos. Além disso, o AITC não apresentou efeito residual sobre a taxa

instantânea de crescimento populacional (r_i), indicando dissipação do composto após o período de exposição.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que o sistema de recirculação de AITC pode ser incorporado a estruturas de aeração já existentes, o que favorece sua utilização em unidades armazenadoras. A possibilidade de uso em rotação com fumigantes convencionais amplia seu potencial no manejo integrado de pragas, especialmente em cenários de resistência à fosfina.

Apesar dos resultados consistentes, a validação em escala comercial ainda é necessária. Os experimentos foram conduzidos em protótipo com capacidade para 60 kg de grãos, e fatores como heterogeneidade da massa, variações de umidade e condições operacionais podem influenciar o desempenho do sistema em larga escala. Além disso, a avaliação foi restrita a espécies-chave, sendo recomendada a ampliação para outros insetos de importância econômica.

Diante disso, estudos futuros devem considerar a aplicação do sistema em condições reais de armazenamento, a avaliação em diferentes níveis de umidade dos grãos e a análise de viabilidade econômica. Investigações sobre estratégias de liberação controlada do AITC também podem contribuir para otimizar sua aplicação.

De forma geral, esta tese demonstra que o uso do AITC com recirculação de ar constitui uma alternativa eficiente para o controle de insetos-praga em milho armazenado. A combinação entre distribuição uniforme do composto e modulação térmica da resposta dos insetos permite reduzir o tempo de exposição necessário para o controle, sem comprometer a qualidade dos grãos. Esses resultados contribuem para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis no armazenamento de grãos e ampliam as possibilidades de substituição ou complementação do uso de fumigantes convencionais.