

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

GIOVANNA LYSSA LACERDA COSTA

**APLICAÇÃO DO OZÔNIO EM GRÃOS DE FEIJÃO COMUM COMO
ALTERNATIVA PARA CONTROLE DE ADULTOS DE *Zabrotes subfasciatus***

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2023

GIOVANNA LYSSA LACERDA COSTA

**APLICAÇÃO DO OZÔNIO EM GRÃOS DE FEIJÃO COMUM COMO
ALTERNATIVA PARA CONTROLE DE ADULTOS DE *Zabrotes subfasciatus***

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2023

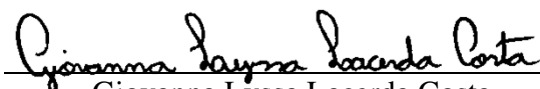
GIOVANNA LYSSA LACERDA COSTA

**APLICAÇÃO DO OZÔNIO EM GRÃOS DE FEIJÃO COMUM COMO
ALTERNATIVA PARA CONTROLE DE ADULTOS DE *Zabrotes subfasciatus***

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 05 de julho de 2023.

Assentimento:


Giovanna Lyssa Lacerda Costa
Autora


Ernandes Rodrigues de Alencar
Orientador

*A Deus, Aos meus pais, Cláudia e Jonatas,
A minha irmã Priscila*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda proteção e saúde.

Aos meus pais, Cláudia Silene e Jonatas Martins, por todo amor, ensinamento, motivação e incentivo de todos os dias.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), por tantas oportunidades que me ajudaram a me desenvolver.

Ao professor Ernandes Rodrigues de Alencar pela orientação e ensinamentos.

Ao Marcus Vinicius Assis Silva e Eugênio P. Edmundo Siteo, pela coorientação, inúmeros ensinamentos, apoio e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório Daniele e Vitor pelo companheirismo, apoio e boas risadas.

Às grandes amigas construídas em Viçosa, em especial João Victor Nogueira, Laura Parma, Gabriela Ribas, Antonella, Tállyson, Emerson, Gabriel Livieri, Ingrid, João Pedro, Hans Dohry, Gabriel Araújo, Gabriel Oliveira e Antônio, por tantas conversas boas e apoio mútuo.

As colegas de República, por compartilhar tantos momentos bons, apoiar nos desafios e nos cafés da tarde juntas. Obrigada!

Ao professor Alisson Carraro e toda equipe do PET.EAA por toda confiança e oportunidade.

Ao professor Aziz Galvão e equipe AgroPlus UFV, AgriHub e ConectarAGRO, pela confiança e por terem me proporcionado muitas oportunidades de crescimento profissional e pessoal.

A todos os professores e aos funcionários da UFV que contribuíram com a minha formação.

A todos aqueles que contribuíram para realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional. Meu muito obrigada!

RESUMO

COSTA, Giovanna Lyssa Lacerda, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Aplicação do gás ozônio em grãos de feijão comum como alternativa para controle de adultos de *Zabrotes subfasciatus***. Orientador. Ernandes Rodrigues de Alencar. Coorientadores: Marcus Vinicius de Assis Silva e Eugênio da Piedade Edmundo Siteo.

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos alimentos mais importantes na dieta dos brasileiros. Apesar disso, sua disponibilidade é afetada pela presença de insetos-praga no setor de armazenamento. O *Zabrotes subfasciatus* é um dos principais insetos-praga de feijão armazenado, e seu controle tem sido feito por fosfina (PH₃) que é um agrotóxico com efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. O gás ozônio (O₃) vem sendo estudado como alternativa aos inseticidas sintéticos para o controle de insetos-praga em produtos armazenados. Neste sentido, objetivou-se com este trabalho (i) caracterizar o processo de saturação do O₃ em grãos de feijão; (ii) determinar o tempo de exposição dos grãos ao ozônio com efeitos no controle de insetos adultos de *Z. subfasciatus* e (iii) avaliar a qualidade dos grãos ozonizados. Para aplicação do O₃, amostras de 3,00 kg de grãos foram acondicionadas em protótipo cilíndrico de PVC (0,30 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro) dotado de tela metálica localizada a 0,05 m da base do protótipo. A concentração de entrada do O₃ foi de 2,40 mg L⁻¹, adotando-se vazão volumétrica de 0,50 m³ min⁻¹ t⁻¹. Para tratamento controle, utilizou-se oxigênio aplicado na vazão volumétrica de 0,50 m³ min⁻¹ t⁻¹. O gás ozônio foi aplicado na base do protótipo contendo grãos de feijão, sendo a concentração residual quantificada na saída dos grãos. A concentração residual do ozônio foi determinada em intervalos regulares de tempo até que o gás permanecesse constante. Determinaram-se o tempo de saturação do gás O₃ e a concentração de saturação. Para determinar a eficácia do O₃ no controle de insetos adultos de *Z. subfasciatus*, as gaiolas contendo 20 insetos foram inseridas na massa de grãos dentro do protótipo e em seguida submetido ao tratamento. Quantificou-se o número de insetos mortos após o tratamento. Na avaliação da qualidade, considerou-se o teor de água, tempo de cocção, condutividade elétrica e cor dos grãos. O tempo de saturação e a concentração de saturação do ozônio na massa de grãos foram de 1,45 h e 0,53 mg L⁻¹, respectivamente. A concentração de 2,40 mg L⁻¹ controlou 100% dos insetos (*Z. subfasciatus*) na massa de grãos no período de exposição 4,50 h. O processo de ozonização dos grãos não alterou a qualidade dos grãos. A partir destes resultados, concluiu-se que o ozônio é capaz de controlar insetos adultos de *Z. subfasciatus* em grãos de feijão e não alterou o teor de água, tempo de cocção, condutividade elétrica e cor dos grãos que pudesse comprometer a qualidade comercial do produto.

Palavras-chave: Armazenamento. Ozonização. *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

COSTA, Giovanna Lyssa Lacerda, Universidade Federal de Viçosa, July 2023. **Application of ozone gas on common bean grains as an alternative for the control of *Zabrotes subfasciatus* adults.** Advisor: Ernandes Rodrigues de Alencar. Co-advisor: Marcus Vinicius de Assis Silva and Eugênio da Piedade Edmundo Siteo.

Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are one of the most important foods in the Brazilian diet. However, their availability is affected by the presence of insect pests in the storage sector. *Zabrotes subfasciatus* is one of the main pests of stored beans, and its control has been achieved using phosphine (PH₃), which is an agrochemical with harmful effects on human health and the environment. Ozone gas (O₃) has been studied as an alternative to synthetic insecticides for controlling pest insects in stored products. In this regard, this study aimed to (i) characterize the process of ozone saturation in beans; (ii) determine the exposure time of beans to ozone that affects the control of adult *Z. subfasciatus* insects, and (iii) evaluate the quality of ozonized beans. For the ozone application, samples of 3.00 kg of beans were placed in a cylindrical PVC prototype (0.30 m long and 0.20 m in diameter) equipped with a wire mesh located 0.05 m from the base of the prototype. The ozone inlet concentration was 2.40 mg L⁻¹, with a volumetric flow rate of 0.50 m³ min⁻¹ t⁻¹. Oxygen was used as a control treatment at a volumetric flow rate of 0.50 m³ min⁻¹ t⁻¹. Ozone gas was applied at the base of the prototype containing the beans, and the residual concentration of ozone was quantified at the outlet of the beans. The residual ozone concentration was determined at regular time intervals until the gas remained constant. The saturation time of ozone gas and the saturation concentration were determined. To determine the efficacy of ozone in controlling adult *Z. subfasciatus* insects, cages containing 20 insects were inserted into the mass of beans inside the prototype and then subjected to treatment. The number of dead insects was quantified after treatment. Quality evaluation included water content, cooking time, electrical conductivity, and color of the beans. The ozone saturation time and concentration in the mass of beans were 1,45 h and 0.53 mg L⁻¹, respectively. The concentration of 2.40 mg L⁻¹ controlled 100% of the insects (*Z. subfasciatus*) in the grain mass during a 4,50-h exposure period. The grain ozonation process did not alter the grain quality. Based on these results, it was concluded that ozone is capable of controlling adult *Z. subfasciatus* insects in bean grains without altering the water content, cooking time, electrical conductivity, and color of the grains that could compromise the commercial quality of the product.

Keywords: Storage. Ozonation. *Phaseolus vulgaris* L.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 Origem e caracterização dos grãos de feijão comum	12
2.2 Procedimento experimental	12
2.2.1 Ozonização dos grãos	12
2.2.2 Tempo de saturação dos grãos de feijão com ozônio.....	13
2.2.3 Avaliação do efeito do ozônio no controle de <i>Z. subfasciatus</i> em grãos de feijão ..	14
2.3 Análise de qualidade de grãos de feijão.....	15
2.3.1 Teor de água.....	15
2.3.2 Condutividade elétrica	15
2.3.3 Tempo de cocção.....	15
2.3.4 Cor	16
2.4 Análise estatística.....	17
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1 Tempo de saturação	18
3.2 Mortalidade de <i>Z. subfasciatus</i>	19
3.3 Qualidade dos grãos	20
4 CONCLUSÕES.....	23
REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris L.*) é um dos alimentos mais importantes na dieta alimentar dos brasileiros. O grão é fonte de proteínas, minerais, carboidratos e lipídios (REZENDE et al., 2018). O cultivo do feijão é feito em diversos países, sendo a Ásia com maior área produtiva (WANG et al., 2022). O Brasil se destaca como um dos principais produtores e consumidores mundiais do feijão (FAOSTAT, 2022). De acordo com o sexto levantamento de safra de feijão de 2022/23, feito pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de grãos de feijão no Brasil foi estimada em 2.919,2 mil toneladas (CONAB, 2023).

Após a etapa de colheita, o feijão passa por processo de beneficiamento, onde é realizada a pré-limpeza, secagem, limpeza, padronização e armazenagem do grão. Durante o processo de armazenamento, o feijão fica vulnerável ao ataque de insetos-praga, principalmente em países tropicais (ADERIRE et al., 2011). O *Zabrotes subfasciatus* (Boheman, 1833) (Coleoptera: Bruchidae) é um dos insetos-praga mais importantes no feijão armazenado. Entre os problemas causados pela sua presença, destacam-se a redução da matéria seca dos grãos e de qualidade nutricional. Vários métodos alternativos de controle de insetos-praga têm sido desenvolvidos para reduzir as perdas pós-colheita dos grãos (HSIEH et al., 1998; SOUSA et al., 2008; IŞIKBER & ATHANASSIOU, 2015; MORAGLIO et al., 2018; SINGH, 2021).

O controle dos insetos-praga em produtos armazenados pode ser feito por combinação de diversos métodos. Dentre os principais métodos de controle de insetos-praga destacam-se os fumigantes fosfeto de alumínio (PH₃) ou pela aplicação de inseticidas organofosforados (malatim, fenitritim, clorpirimifósmetílico e pirimifós-metílico) e piretróides (deltametrina, cipermetrina e permetrina) (SOUSA et al., 2008). Contudo, a falta de infraestruturas adequada para a utilização desses métodos, o uso desordenado e aplicações incorretas oferecem riscos à saúde humana, ao meio ambiente, e tem causado o aumento de surgimento de insetos-praga tolerantes e resistentes aos métodos comumente utilizados para a proteção dos grãos (COLLINS et al., 2005; NAVARRO, 2006).

O gás ozônio (O₃) têm se destacado como método alternativo para a proteção de grãos armazenados. O ozônio é uma molécula triatômica formada pela combinação de um átomo de oxigênio à molécula diatômica de oxigênio (O₂) (KIM et al., 1999). O ozônio pode ser produzido naturalmente por mecanismo de descargas elétricas (GLAZE; KANG; CHAPIN, 1987; KIM et al., 1999).

O gás ozônio se decompõe em oxigênio molecular, sem deixar resíduos nos grãos, sendo esse processo uma das principais vantagens da utilização desse método como alternativa para

o controle de insetos-praga (KELLS et al., 2001). A utilização do ozônio na operação de aeração e no processo de renovação do ar por meio de movimentação forçada na massa de grãos é sugerida por pesquisadores (NAVARRO & NOYES, 2012; SILVA et al., 2019) e pode ser uma alternativa propícia no manejo dos produtos armazenados (IŞIKBER & ATHANASSIOU, 2015).

Nesse sentido, o ozônio apresenta vantagens em relação a inseticidas convencionais e pode ser utilizado como alternativa ecologicamente correta e economicamente viável para o controle de insetos-pragas (KELLS et al., 2001; KHADRE, YOUSEF & KIM, 2001). Diante do contexto apresentado, objetivou-se com este trabalho (i) determinar o tempo de saturação de grãos de feijão pelo ozônio, (ii) avaliar o tempo de exposição necessário para o controle dos insetos adultos de *Zabrotes subfasciatus* e (iii) avaliar o efeito do ozônio na qualidade dos grãos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Origem e caracterização dos grãos de feijão comum

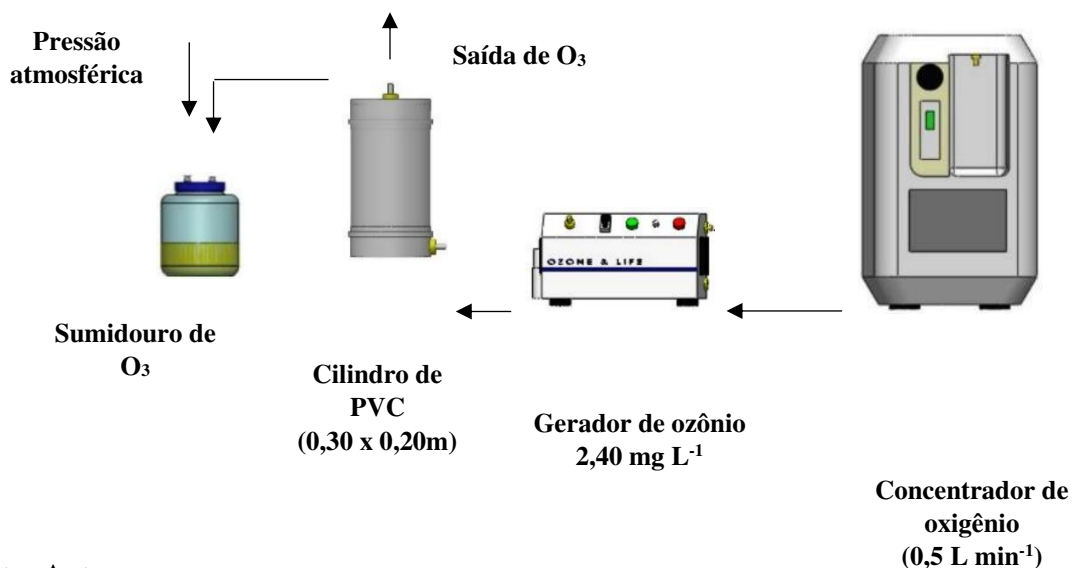
O experimento foi realizado com grãos de feijão comum adquiridos em comércio local (Viçosa, Minas Gerais, Brasil) com teor de água de 15% base úmida (b.u). Os frascos foram mantidos em uma sala de criação climatizada, no Laboratório de Pós-Colheita DEA/UFV e armazenadas por 48 h à temperatura de -18 °C até ao início dos experimentos.

2.2 Procedimento experimental

2.2.1 Ozonização dos grãos

O ozônio foi obtido a partir de um gerador portátil M10 da empresa MyOzone (ADL Ambiental, Jaguariúna, São Paulo, Brasil). Como insumo para a geração de ozônio utilizou-se oxigênio proveniente de concentrador modelo EverFlo (*Philips Respironics*, Murrysville, Pensilvânia, EUA), aplicado na vazão de $0,50 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. A concentração de ozônio foi determinada pelo método iodométrico (Clescerl et al. 2000). A ozonização do feijão foi feita em um protótipo de PVC, com as dimensões de 0,30 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro (Figura 1).

Figura 1 - Representação esquemática do procedimento experimental adotado



Fonte: Autores.

A coluna cilíndrica foi dotada de um *plenum* constituído por uma tela metálica na altura de 0,10 m para promover a sustentação dos grãos e distribuição uniforme do ozônio. Os grãos foram expostos ao tratamento com ozônio e oxigênio (controle) na vazão específica de 0,50 m³ min⁻¹ t⁻¹. A vazão específica utilizada no presente estudo se encontra dentro da faixa recomendada para a aeração de grãos, que varia de 0,10 a 0,55 m³ min⁻¹ t⁻¹ (KALIYAN et al., 2007; OLATUNDE et al., 2016; YANG et al., 2017). A concentração do ozônio adotada no presente estudo está em conformidade com trabalhos já realizados que comprovaram a eficiência do gás no controle de insetos-praga (MCDONOUGH et al., 2011). Os tempos de exposição dos grãos adotados no presente estudo foram de 4,5 e 10 h.

2.2.2 Tempo de saturação dos grãos de feijão com ozônio

A concentração de entrada do gás ozônio foi de 2,40 mg L⁻¹ aplicado na base da coluna de grãos. As concentrações do gás na saída do protótipo foram monitoradas em intervalos de 5,00 min até o instante em que as leituras da concentração de ozônio permanecerem constantes. Quando a concentração residual do ozônio não variou em função do tempo, houve o indicativo que a massa de grãos atingiu o estado de saturação. O ozônio residual foi direcionado para um frasco de vidro contendo solução de iodeto de potássio (KI) 2% para degradar o gás excedente. Os dados de concentração de ozônio no tempo foram ajustados a uma equação sigmoidal (Equação 1) com o intuito de avaliar a relação entre os valores de concentração de ozônio e tempo de exposição.

$$C = \frac{a}{\left(1 + e^{-\left(\frac{t-b}{c}\right)}\right)} \quad (1)$$

Em que:

C = concentração de gás ozônio (mg/L)

t = tempo (min);

a, b, c = constantes.

Por meio das constantes *b* e *c* da equação sigmoidal ajustada aos dados de saturação foi possível estimar o tempo de saturação (*t*_{sat}) (Equação 2) (VENEGAS, HARRIS & SIMON, 1998; ALENCAR et al., 2011). A partir do tempo de saturação foi possível estimar o valor da concentração de saturação (*C*_{sat}).

$$t_{sat} = b + 2c \quad (2)$$

Em que:

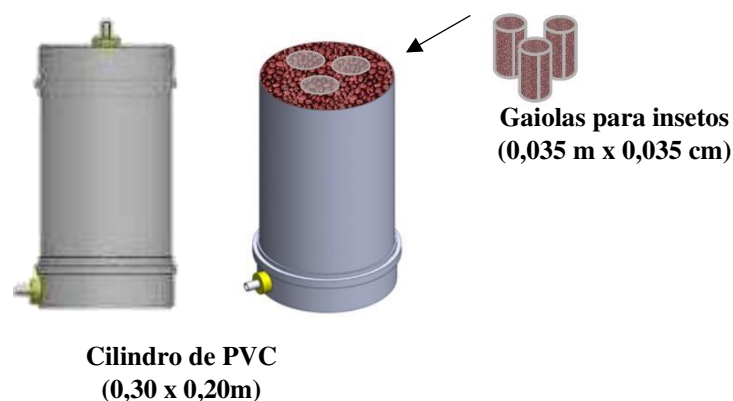
t_{sat} = tempo de saturação (min);

2.2.3 Avaliação do efeito do ozônio no controle de *Z. subfasciatus* em grãos de feijão

A população de *Z. subfasciatus* foi obtida no Laboratório de Pós-colheita de Grãos da Universidade Federal de Viçosa. Os insetos adultos foram obtidos a partir de criações em recipientes de vidro (0,80 L) contendo grãos de feijão comum como substrato alimentar. Em cada recipiente, colocou-se 0,20 kg de feijão e 100 insetos adultos. Os recipientes foram mantidos sob condições constantes de temperatura ($30 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade relativa ($70 \pm 5\%$).

Para avaliar o efeito do ozônio no controle de *Z. subfasciatus*, insetos adultos de no máximo três dias de emergência foram colocados em gaiolas de tipo organza (100% poliéster, 35 g m^{-2} , Fabtex, Nova Delhi, Índia), com armação em PVC (0,035 m x 0,035 m) e inseridos dentro do protótipo contendo grãos de feijão (Figura 2). Os insetos foram expostos ao gás ozônio e ao oxigênio (controle). No total, para cada repetição foram dispostas na massa de grãos 10 gaiolas contendo 0,01 kg de grãos de feijão comum e 20 insetos adultos de *Z. subfasciatus* em triplicata para cada repetição. A mortalidade dos insetos foi avaliada 24 e 48 h após o período de exposição dos grãos ao gás ozônio. Os insetos foram considerados mortos quando não responderem aos estímulos realizados com o auxílio de um pincel. O número de insetos mortos no tratamento com o ar atmosférico foi utilizado para a correção da mortalidade (ABBOT, 1925).

Figura 2 - Disposição das gaiolas com insetos na coluna cilíndrica submetida ao tratamento com ozônio



Fonte: Autores.

2.3 Análise de qualidade de grãos de feijão

Na avaliação da qualidade dos grãos de feijão após o tratamento com o ozônio foram determinado o teor de água, a condutividade elétrica, o tempo de cocção e a cor. Todas as amostras foram acondicionadas em câmara climática do tipo BOD (Demanda Bioquímica de Oxigênio) a 25 °C até o momento das análises.

2.3.1 Teor de água

O teor de água de feijão foi determinado de acordo com o método de estufa descrito pela ASAE (*American Society of Agricultural Engineers*, 2000). As amostras de feijão foram colocadas em estufa com convecção forçada de ar, à temperatura de 103 °C, por 72 h. A análise foi feita em triplicata e os resultados foram expressos em porcentagem em base úmida (% b.u.).

2.3.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica nos grãos de feijão comum foi determinada segundo Vieira et al. (2002). Cinquenta grãos foram acondicionados em copos de plástico de 0,25 L. Os grãos foram pesados e imersos em 0,075 L de água destilada e acondicionados em câmara climática do tipo BOD (Demanda Bioquímica de Oxigênio) a 25 °C por 24 h. Em seguida, as amostras foram levemente agitadas e a condutividade elétrica foi determinada utilizando-se um condutivímetro de modelo MCA-150 (*Tecnopon*, Piracicaba, São Paulo, Brasil), foram feitas em triplicata para cada repetição e os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$.

2.3.3 Tempo de cocção

O tempo de cocção das amostras de feijão comum foi determinado a partir de um aparelho cozedor de Mattson (MATTSON, 1946; JACKSON & VARRIANO-MARSTON, 1981). O aparelho possui 25 hastes com 0,216 m de comprimento e peso de 0,082 kg cada. Na extremidade de cada haste apresenta uma ponta afunilada com 0,2 mm de diâmetro e 0,9 mm de comprimento, que fica apoiada perpendicularmente sobre o grão (RESENDE et al., 2008). Para cada unidade experimental, quatro amostras de 0,05 kg de feijão comum foram embebidas em 0,20 L água destilada à temperatura de 25 °C por 12 h (ÁVILA et al., 2015). Em seguida, 25 grãos inteiros e com o tegumento intacto foram selecionados e posicionados na base do

aparelho. As hastes foram cuidadosamente posicionadas sobre os grãos. O aparelho foi colocado em um recipiente metálico contendo 1,5 L de água destilada em estado de ebulição. Um cronômetro foi utilizado para registrar o tempo de queda de cada haste durante o cozimento. Os grãos foram considerados cozidos quando a 13ª haste penetrou o grão.

2.3.4 Cor

Para a análise da cor, foi utilizado colorímetro modelo CR410 (Konica Minolta, Osaka, Japão). Inicialmente foram determinadas as coordenadas L^* (intensidade de branco a preto), a^* (intensidade de vermelho a verde), e b^* (intensidade de amarelo a azul) feitas em triplicatas. As coordenadas L^* , a^* e b^* foram utilizadas para calcular a tonalidade de cor ou hue angle (h^* , Equação 3), a saturação de cor ou chroma (C^* , Equação 4) e a diferença de cor (ΔE^* , Equação 5) (MASKAN et al., 2001).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

$$h^* = \arctg\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (4)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (5)$$

Em que:

L = intensidade de branco a preto;

a = intensidade de vermelho a verde;

b = intensidade de amarelo a azul;

h = tonalidade de cor ou hue angle;

C = saturação de cor ou chroma;

ΔE = diferença de cor;

L_0^* , a_0^* e b_0^* são as coordenadas obtidas nos grãos não tratado com o gás ozônio.

2.4 Análise estatística

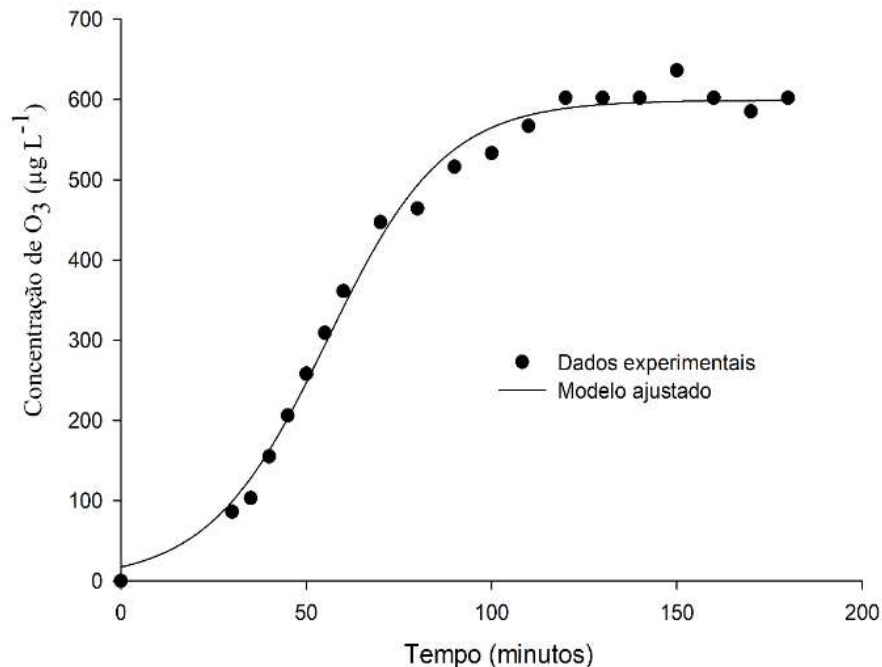
Os dados de saturação dos grãos foram submetidos á análise de regressão pelo software Sigmaplot v. 12.0 (Systat Software Inc, Germany). Os dados de análise do efeito de ozônio no controle de insetos adultos de *Z. subfasciatus* e de qualidade dos grãos foram submetidos a análise de variância e os valores médios foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Tempo de saturação

Apresentam-se na Figura 3 e na Tabela 1, os resultados referentes ao processo de saturação da massa de grãos de feijão com gás ozônio, quando se adotou a vazão específica de $0,5 \text{ L min}^{-1}$, para concentração de entrada de $2,40 \text{ mg L}^{-1}$.

Figura 3 - Concentração residual do ozônio ($\mu\text{g L}^{-1}$) em função do tempo (min) durante o processo de saturação dos grãos de feijão na vazão de $0,5 \text{ L min}^{-1}$ e concentração de entrada de ozônio de $2.400 \mu\text{g L}^{-1}$



Fonte: Autora.

Tabela 1 – Equações de regressão ajustadas e respectivos coeficientes de determinação (R^2), para concentração residual do ozônio ($\mu\text{g L}^{-1}$) em função do tempo (min) de exposição de feijão, na concentração de entrada de $2,40 \text{ mg L}^{-1}$

Concentração de ozônio (mg L^{-1})	Modelo Ajustado	R^2	t_{sat} (h)	c_{sat} (mg L^{-1})	C_{sat}/C_0
2,40	$\hat{y} = \frac{599,04}{\left(1 + e^{\frac{-(t-55,5936)}{15,8264}}\right)}$	0,99	1,45	0,53	0,22

\hat{y} - Concentração estimada; R^2 – Coeficiente de determinação; t_{sat} – Tempo de saturação; c_{sat} – Concentração de saturação ($\mu\text{g L}^{-1}$); C_0 - Concentração de entrada

Fonte: Autora.

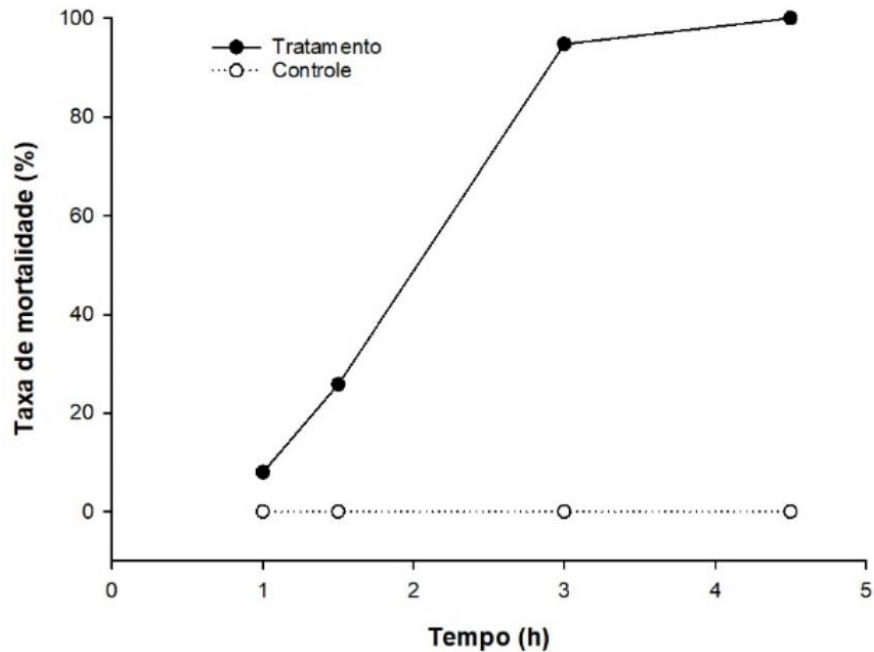
O processo de saturação do feijão foi descrito por meio da equação ajustada contida na Tabela 1. O coeficiente de determinação (R^2) do processo de saturação foi de 0,99. O tempo de saturação foi estimado em 1,45 h. A concentração de saturação (C_{sat}), para o tempo de saturação de 1,45 h, foi de $0,53 \text{ mg L}^{-1}$, com relação entre C_{sat} e C_0 igual a 0,22 (Tabela 1).

Os resultados obtidos para o processo de saturação do feijão seguem o mesmo comportamento já reportado em outras investigações científicas que estudaram o processo de saturação em grãos com gás ozônio (ALENCAR et al., 2011; SILVA et al., 2019; ABREU et al., 2020). Ficou evidente neste estudo que em grãos de feijão o escoamento do ozônio pelo produto ocorre em duas fases. No primeiro momento a interação do ozônio com a massa de grãos é muito intensa e o gás se degrada rapidamente em oxigênio. Em segundo momento, após todos os sítios ativos dos grãos terem reagido com ozônio, o gás passa a escoar livremente pela massa, sendo o indicativo de que foi atingido o estado de saturação (STRAIT et al., 1998; KELLS et al., 2001; MENDEZ et al., 2003). A primeira fase do processo de saturação do feijão ficou mais evidente quando se registrou baixas concentrações do gás nas primeiras leituras (Figura 3). A segunda fase foi observada quando os valores de concentração do ozônio não variaram em função do tempo nos grãos de feijão ozonizados.

3. 2 Mortalidade de *Z. subfasciatus*

Na Figura 4 são apresentadas as curvas que mostram a mortalidade dos insetos adultos de *Z. subfasciatus* expostos ao ozônio e ao oxigênio (controle), para vazão específica de $0,5 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ no período de exposição total de 4,5 h.

Figura 4 - Mortalidade de insetos adultos de *Z. subfasciatus* em função do tempo (min), na concentração de entrada de $2.400 \mu\text{g L}^{-1}$



Fonte: Autora.

A mortalidade de 100% do *Z. subfasciatus* foi observada quando os insetos foram expostos a 4,5 h. Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com observações científicas anteriores. O uso de atmosfera modificada com gás ozônio pode ser uma alternativa eficiente para o controle de insetos-praga em produtos armazenados, incluindo *Sitophilus zeamais* (KELLS et al., 2001; ROZADO et al., 2008; SOUSA et al., 2012; SILVA et al., 2019), *Tribolium castaneum* (KELLS et al., 2001; IŞIKBER & ÖZTEKIN, 2009; MCDONOUGH et al., 2011) e *Callosobruchus maculatus* (PANDISELVAM et al., 2019; ABREU et al., 2020).

3.3 Qualidade dos grãos

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de teor de água dos grãos, tempo de cocção, condutividade elétrica e parâmetros da cor logo, depois o tratamento com gás ozônio na concentração de $2,40 \text{ mg L}^{-1}$ e com oxigênio (controle). Em geral, a qualidade de feijão não foi alterada significativamente ($p > 0.05$) pelo tratamento com gás ozônio nos tempos de exposição de 4,5 e 10,0 h. Os resultados observados neste estudo, foram similares aos resultados científicos anteriores (MENDEZ et al., 2003; SILVA et al., 2019). No presente estudo, o teor de água permaneceu entre 14,8% e 15,2%. O tempo de cocção do feijão entre 0,97 e 1,34 h,

sendo superior aos valores obtidos por Siteo et al. (2022). Os valores elevados de tempo de cocção podem ser associados a característica inicial dos grãos. O tempo de cocção é um parâmetro de qualidade importante no feijão e está associado a dureza dos grãos (FREITAS, FARONI & SOUSA, 2016; SITOIE et al., 2023). Períodos de cozimento maiores exigem maior gasto energético e afeta a qualidade nutricional dos grãos (WOOD, 2016).

Tabela 2 – Valores médios de teor de água dos grãos, o tempo de cocção, condutividade elétrica e parâmetros da cor dos grãos de feijão expostos ao oxigênio (controle) e gás ozônio (tratamento), na concentração de entrada de 2,40 mg L⁻¹

Parâmetros de qualidade	4,5 horas		10,0 horas	
	Controle [DP]	Ozônio [DP]	Controle [DP]	Ozônio [DP]
Teor de água (% b.u.)	15,15 ± 0,17a	14,85±0,09a	15,15±0,17a	14,92±0,13a
Tempo de cocção (min)	1,12 ± 0,06a	1,14 ± 0,05a	1,12 ± 0,06a	0,99 ± 0,05a
Condutividade elétrica (μS cm ⁻¹ g ⁻¹)	0,86 ± 0,01a	0,88±0,01a	0,86±0,01a	0,87±0,02a
Tonalidade de cor (h*)	14,67 ± 1,53a	12,30±2,49a	14,67±1,53a	12,43±2,68a
Saturação de cor (C*)	9,52 ± 1,44a	8,77±1,35a	9,52±1,44a	8,31±1,63a
Diferença de cor (ΔE*)	-	7,13±0,76	-	7,73±1,55

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha para cada parâmetro, não diferem estatisticamente a um nível de significância de 5%. [DP] - Desvio Padrão.

Fonte: Autora.

Para a condutividade elétrica, os valores médios foram inferiores a 1,0 μS cm⁻¹ g⁻¹, sendo considerados baixos para grãos (Tabela 1). Valores elevados de condutividade elétrica implicam em maior grau de deterioração dos grãos (FESSEL et al., 2006). Ressalta-se que apesar do elevado potencial oxidativo do ozônio (2,07 mV) (KIM et al., 1999), o gás não alterou a condutividade elétrica. Ressalta-se que outros autores observaram o aumento da condutividade elétrica em grãos ozonizados, mas essa tendência é dependente da concentração de entrada do gás e do tempo de exposição (SILVA et al., 2019; SITOIE et al., 2022).

Apesar de ter sido observada ligeira tendência de redução da tonalidade de cor e da saturação de cor nos grãos de feijão ozonizados, em comparação com o controle, não houve diferença significativa (Tabela 2). Destaca-se que a cor é fundamental na avaliação da qualidade de alimentos, assim como na aceitação por parte dos consumidores (MASKAN et al., 2001). A alteração na cor em produtos ozonizados, como grãos e castanhas, já foi associada a degradação

de pigmentos na casca ou película. No que se refere a diferença de cor, os valores superiores a 7,0, obtidos nos grãos ozonizados, indicam alteração que podem ser perceptíveis aos consumidores (ALTMANN et al., 2022). Essa alteração foi observada em amendoim (ALENCAR et al., 2012) e castanha-do-Brasil (OLIVEIRA et al., 2020). Mas esses autores não indicaram que tais alterações inviabilizam a comercialização dos produtos.

4 CONCLUSÕES

O tempo em que a massa de grãos de feijão comum foi saturada com ozônio foi de 1,45 horas, com concentração de saturação de 0,53 mg L⁻¹.

Os insetos adultos de *Z. subfasciatus* foram susceptíveis a exposição ao gás ozônio, obtendo-se 100% de mortalidade, quando adotada a concentração de entrada de 2,40 mg L⁻¹, vazão específica de 0,50 m³ min⁻¹ t⁻¹ e tempo de exposição de 4,5 horas.

O teor de água, condutividade elétrica, tempo de cocção e cor dos grãos não foram alterados pelo ozônio, de modo a comprometer a comercialização do produto.

REFERÊNCIAS

- ABBOT, W. S. A method for computing the effectiveness of an insecticide. **Journal of Economic Entomology**, n. 18, p. 265–267, 1925.
- ABREU, ARTUR OLIVEIRA. Ozônio como alternativa para o controle de *Callosobruchus maculatus* em grãos de feijão-caupi. Viçosa, MG. 2020. Disponível em: < <https://www.locus.ufv.br/>>. Acesso em: 10 de jun. 2023.
- ADEDIRE, C. O.; OBEMBE, O. M.; AKINKUROLERE, R. O. & ODULEYE, S. O. Response of *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Chrysomelidae: Bruchinae) to extracts of cashew kernels. **Journal of plant diseases and protection**, v. 118, n. 2, 75-79, 2011.
- ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D’A.; MARTINS, M. A., COSTA, A. R. & CECON, P. R. Decomposition kinetics of gaseous ozone in peanuts. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 5, p. 930-939, 2011.
- ALTMANN, B. A., GERTHEISS, J., TOMASEVIC, I., ENGELKES, C., GLAESENER, T., MEYER, J., & MÖRLEIN, D. Human perception of color differences using computer vision system measurements of raw pork loin. **Meat Science**, 188, 108766, 2022.
- ANNIS, P.C. Requirements for fumigations and controlled atmospheres as options for pest and quality control in stored grain. In: CHAMP, B.R., HIGHEY, E., BANKS, H.J. (Eds) **Fumigation and controlled atmosphere storage of grain**. Singapore: ACIAR, p.20-28. (Proceedings, 25), 1990.
- ASAE – American Society of Agricultural Engineers. **Moisture Measurement -Unground Grain and Seeds**. St. Joseph, p.567, 2004.
- ÁVILA, B. P.; DOS SANTOS, M. S.; NICOLETTI, A. M.; ALVES, G. D.; ELIAS, M. C., MONKS, J. & GULARTE, M. A. Impact of different salts in soaking water on the cooking time, texture and physical parameters of cowpeas. **Plant foods for human nutrition**, v.70, n. 4, p. 463-469, 2015.
- CLESCERL, L.S.; GREENBERG, A.E. EATON, A.D. Standard methods for the examination of water and wastewater. **Denver: American Water Works Association**, 1220p, 2000.
- COLLINS, P.J., DAGLISH, G.J., PAVIC, H., KOPITTKER, R.A. Response of mixed-age cultures of phosphine-resistant and susceptible strains of lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica*, to phosphine at a range of concentrations and exposure periods. **Journal of Stored Products Research**, 41, 373-385. 2005.
- CONAB. **Boletim da safra de grãos**. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safras-de-graos>>. Acesso em: 06 abril. 2023.
- FAOSTAT. **Crops**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 15 abr. 2022.

FESSEL, S. A., VIEIRA, R. D., CRUZ, M. C. P. D., PAULA, R. C. D., & anobianco, M. Electrical conductivity testing of corn seeds as influenced by temperature and period of storage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1551-1559, 2006.

FREITAS, R. S.; FARONI, L. R. D'A. & SOUSA, A. H. Hermetic storage for control of common bean weevil, *Acanthoscelides obtectus* (Say). **Journal of Stored Products Research**, v. 66, p. 1-5, 2016.

GLAZE, W. H.; KANG, J.-W. & CHAPIN, D. H. "The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation. **Ozone Science & Engineering**. v.9, n.4, p. 335-352, 1987.

IŞIKBER, A. A. & ÖZTEKIN, S. Comparison of susceptibility of two stored-product insects, *Ephestia kuehniella* Zeller and *Tribolium confusum* du Val to gaseous ozone. **Journal of Stored Products Research**, v. 45, n. 3, p. 159-164, 2009.

IŞIKBER, A. A. & ATHANASSIOU, C. G. The use of ozone gas for the control of insects and micro-organisms in stored products. **Journal of Stored Products Research**, v. 64, parte B, p. 139-145, 2015.

HSIEH, S.P.Y.; NINQ, S.S. & TZENG, D.D.S. Control of turf grass seedborne pathogenic fungi by ozone. **Plant Pathology Bulletin**, v.7, p.105-112, 1998.

JACKSON, G. M. & VARRIANO-MARSTON, E. Hard-to-cook phenomenon in beans: effects of accelerated storage on water absorption and cooking time. **Journal of Food Science**, v. 46, n. 3, p. 799-803, 1981.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V.; WILCKE, W.F.; CARRILLO, M.A. & CANNON, C.A. Low-temperature aeration to control Indianmeal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner), in stored grain in twelve locations in the United States: a simulation study. **Journal of Stored Products Research**, 43(2), 177-192, 2007.

KELLS, S. A.; MASON, L. J.; MAIER, D. E. & WOLOSHUK, C. P. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. **Journal of Stored Products Research**, v. 37, n. 4, p. 371-382, 2001.

KHADRE, M. A.; YOUSEF, A. E. & KIM, J. G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. **Journal of food science**, v. 66, n. 9, p. 1242-1252, 2001.

KIM, J. G.; YOUSEF, A. E. & DAVE, S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. **Journal of Food Protection**. Des Moines, v. 62, n. 9 p. 1071-1087, 1999.

MASKAN, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 2, p. 169-175, 2001.

MATTSON, S. The cookability of yellow peas. A colloid-chemical and biochemical study. **Acta Agriculturae Suecana**, v. 2, p. 185-231, 1946.

MCDONOUGH, M. X.; MASON, L. J. & WOLOSHUK, C. P. Susceptibility of stored product insects to high concentrations of ozone at different exposure intervals. **Journal of Stored Products Research**, v. 47, n. 4, p. 306-310, 2011.

MENDEZ, F. et al. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance. **Journal of Stored Products Research**, v. 39, n. 1, p. 33-44, 2003.

MORAGLIO, S. T. et al. Effect of ozone gas against life stages of *Ephestia kuehniella* Zeller (Lepidoptera: Pyralidae) in laboratory and a storehouse. **Journal of Stored Products Research**, v. 79, p. 132-138, 2018.

NAVARRO, S. New global challenges to the use of gaseous treatments in stored products. Proceedings of the 9th International Working Conference on Stored-Product Protection, Campinas: **ABRAPOS**, p. 495-509, 2006.

NAVARRO, S., S.; FINKELMAN, J. E. DONAHAYE, A; ISIKBER, M. RINDNER & R. DIAS. "Development of a Methyl Bromide Alternative for the Control of Stored Product Insects Using a Vacuum Technology." Paper presented at the **International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products**, Gold-Coast Australia, August 227- 234, 2007.

OLATUNDE, G.; ATUNGULU, G. G., AMP & SADAKA, S., 2016. CFD modeling of air flow distribution in rice bin storage system with different grain mass configurations. **Biosystems Engineering**, 151, 286-297.

OLIVEIRA, J. M.; de Alencar, E. R.; Blum, L. E. B.; de Souza Ferreira, W. F.; Botelho, S. D. C. C.; Racanicci, A. M. C. & da Silva, C. R. Ozonation of Brazil nuts: Decomposition kinetics, control of *Aspergillus flavus* and the effect on color and on raw oil quality. **LWT**, 123, 109106, 2020.

PANDISELVAM, R.; THIRUPATHI, V.; MOHAN, S.; VENNILA, P.; UMA, D.; SHAHIR, S. & ANANDAKUMAR, S. Gaseous ozone: A potent pest management strategy to control *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae) infesting green gram. **Journal of Applied Entomology**, v. 143, n. 4, p. 451-459, 2019.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; FARONI, L. R. D. A. & CECON, P. R. Avaliação da qualidade tecnológica do feijão durante o armazenamento. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 517-524, 2008.

REZENDE, A. A. et al. Nutritional and protein quality of dry brazilian beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Food Science and Technology**, v. 38, n. 3, p. 421-427, 2018.

ROZADO, ADRIANO F. et al. Aplicação de ozônio contra *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum* em milho armazenado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 282-285, 2008.

SILVA, M. V. A.; FARONI, L. R. A.; SOUSA, A. H.; PRATES, L. H. F. & ABREU, A. O. Kinetics of the ozone gas reaction in popcorn kernels. **Journal of Stored Products Research**, v. 83, p. 168-175, 2019.

SINGH, KABRAMBAM DASANTA et al. Principais voláteis de plantas como abordagem de manejo de pragas de grãos armazenados: uma revisão. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 4, p. 100127, 2021.

SITOE, EUGÉNIO DA PIEDADE EDMUNDO et al. Low-pressure ozone injection system: relationship between reaction kinetics and physical properties of grains. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 103, n. 3, p. 1183-1193, 2023.

SOUSA, A. H.; FARONI, L. R. D'A.; GUEDES R.N.C.; TÓTOLA M.R.; URRUCHI W.I. Ozone as a management alternative against phosphine-resistant insect pests of stored products. **Journal of Stored Products Research**. Volume 44, Issue 4, p. 379-385, 2008.

SOUSA, A. H.; FARONI, L. R. A.; SILVA, G. N. & GUEDES, R. N. C. Ozone toxicity and walking response of populations of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of economic entomology**, v. 105, n. 6, p. 2187-2195, 2012.

STRAIT, C.A. Efficacy of ozone to control insects and fungi in stored grain. **Purdue University**, West Lafayette, IN, p 59M 1998.

VENEGAS, J. G.; HARRIS, R. S. & SIMON, B.A. A comprehensive equation for the pulmonary pressure-volume curve. **American Physiological Society**, v.84, n.1, p.389-395, 1998.

VIEIRA, R. D.; PENARIOL, A. L.; PERECIN, D. & PANOBIANCO, M. Condutividade elétrica e teor de água inicial das sementes de soja. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1333-1338, 2002.

YANG, Y., WILSON, L. T., ARTHUR, F. H., WANG, J., & JIA, C. 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**, 359, 165-181, 2017.

WANG, YAO et al. Nutritional composition, efficacy, and processing of *Vigna angularis* (Adzuki bean) for the human diet: an overview. **Molecules**, v. 27, n. 18, p. 6079, 2022.

WHITE, N.D.G.; LEESCH, J.G. Chemical control. In: SUBRAMANYAM, B., HAGSTRUM, D. Integrated management of insects in stored products. **New York: Marcel Dekkes**, p.287-330, 1996.